
BACHELORARBEIT

Herr
Christoph Czorny

**Entwicklung und Erprobung einer
selbstregelnden Wärmebrücke auf
Basis einer
Formgedächtnislegierung**

2011

BACHELORARBEIT

Entwicklung und Erprobung einer selbstregelnden Wärmebrücke auf Basis einer Formgedächtnislegierung

Autor:

Christoph Czorny

Studiengang:

Mechatronik

Seminargruppe:

ME08w1-B

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Gerd Dost

Zweitprüfer:

M. Sc. Dipl.-Ing. André Bucht
(Fraunhofer-Institut IWU Dresden)

Mittweida, 2011

Kurzfassung

In der folgenden Arbeit wird eine intelligente Wärmebrücke entwickelt, welche die Temperatur einer Wärmequelle mit variierender Heizleistung so regelt, dass sie einen vorgegebenen Temperaturbereich nicht verlässt.

Dazu wird die Wärmequelle über einen steuerbaren Wärmewiderstand mit einer Wärmesenke verbunden. Verändert sich die Temperatur der Quelle, so regelt der Widerstand den abfließenden Wärmestrom und steuert somit die Temperatur der Wärmequelle. Der veränderbare Wärmewiderstand ist durch einen Luftspalt mit variierender Breite realisiert. Ein Aktor aus einer thermischen Formgedächtnislegierung übernimmt das Einstellen des vorhandenen Luftspaltes. Dieser Aktor ist direkt mit der Wärmequelle gekoppelt und kann somit durch die im Prozess vorhandene Wärme aktiviert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein thermodynamisches Modell entwickelt, welches den möglichen Temperaturregelbereich in Abhängigkeit der konstruktiven Auslegung beschreibt. Es wird untersucht ob und unter welchen Bedingungen ein Schwingen dieses Systems möglich ist.

Im Anschluss erfolgt die Konstruktion sowie der Aufbau eines Demonstrators der selbstregelnden Wärmebrücke. Ein eigens entwickelter Aktor ändert den Wärmewiderstand des Systems in Abhängigkeit der Quellentemperatur. Die Wärmebrücke wird auf ihre Funktion getestet und die Temperaturverläufe der Wärmequelle bei wechselnder Heizleistung werden aufgenommen. Abschließend erfolgt ein Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit den modellierten.

Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelzeichen	III
Abkürzungsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Motivation	1
1.2 Der Formgedächtniseffekt	2
1.2.1 Einwegeffekt	4
1.2.2 Pseudoelastizität	5
1.2.3 Unterdrücktes Formgedächtnis	6
1.3 Gegenstand der Arbeit	7
2 Stand von Wissenschaft und Technik	8
2.1 Regulierbarer Wärmewiderstand	8
2.1.1 Steuerbare Heatpipes	8
2.1.2 Rotationswärmeübertrager	9
2.2 Energieautarke Formgedächtnisaktoren	10
2.2.1 Stent	10
2.2.2 Sicherheitselement im Toaster	11
2.2.3 Verbrühschutz im Brausekopf	12
3 Zielstellung und Lösungsansatz	13
3.1 Zielstellung	13
3.2 Lösungsansatz	14
4 Thermodynamische Modellierung	15
4.1 Ziel des Modells	15
4.2 Erläuterungen zum Modellaufbau	15
4.3 Temperaturniveau in Abhängigkeit der Wärmewiderstände	16
4.3.1 Aufbau des Modells	16
4.3.2 Zusammenfassung des Modells	18
4.3.3 Berechnung des Temperaturverlaufs	19
4.4 Luftspalt in Abhängigkeit der Quelltemperatur	20
4.4.1 Begründung der Vorgehensweise	20
4.4.2 Experimentelle Bestimmung der Größe des Luftspaltes	21

4.5	Ermittlung der Widerstände	22
4.5.1	Widerstand am Luftspalt	23
4.5.2	Widerstand der Wärmesenke	25
4.6	Zusammenführung des Modells	26
4.7	Untersuchung der Schwingungsfähigkeit	27
5	Konstruktion der Wärmebrücke	29
5.1	Aufbau der Wärmebrücke	29
5.2	Konstruktion des Aktors	30
5.2.1	Aufbau des Aktors	30
5.2.2	Funktionsweise des Aktors	31
5.2.3	Ermittlung der Federkennlinien und Belastungsgrenzen	33
5.3	Modellierung des Aktors	35
5.3.1	Erläuterung	35
5.3.2	Modellierung	36
6	Experimentelle Erprobung und Bewertung	38
6.1	Versuchsaufbau und Bedingungen	38
6.2	Versuchsauswertung	39
6.2.1	Sinusförmiger Heizverlauf	39
6.2.2	Rechteckiger Heizverlauf	40
7	Zusammenfassung und Ausblick	42
7.1	Zusammenfassung	42
7.2	Ausblick	43
	Literaturverzeichnis	44
	Eigenständigkeitserklärung	46
	Anhang	i
A	Bestimmung der Übertragungsfunktion des thermischen Ersatzschalt- bildes	i
B	Explosionsansicht Demonstrator	iii
C	Modellierung Federaktor	iv
C.1	Bestimmung der Hubweite H (3.1)	iv
C.2	Bestimmung der Hubweite H' in Abhängigkeit der Restdruckkraft .	vi

Formelzeichen und Konstanten

FORMELZEICHEN	EINHEIT	BEDEUTUNG
b	m	Breite
b_{FGL}	m	Breite FGL-Aktorblech
b_{Stahl}	m	Breite Stahl-Federblech
c	Ws/kg·K	spezifische Wärmekapazität
h	m	Höhe
h_{FGL}	m	Höhe FGL-Aktorblech
h_{Stahl}	m	Höhe Stahl-Federblech
l	m	Breite Luftspalt
m	kg	Masse
s	1/s	komplexe Frequenz
x	m	allgemeine kartesische Koordinate
y	m	allgemeine kartesische Koordinate
A_f	°C	Ende Austenitumwandlung
A_s	°C	Beginn Austenitumwandlung
C	Ws/K	allgemeine Kapazität
C_K	Ws/K	thermische Kapazität Kupferkeil
C_Q	Ws/K	thermische Kapazität Wärmequelle
C_S	Ws/K	thermische Kapazität Wärmesenke
C_{th}	Ws/K	thermische Kapazität
D	N/mm	Federkonstante
D_A	N/mm	Federkonstante Austenitzustand
D_M	N/mm	Federkonstante Martensitzustand
D_{Stahl}	N/mm	Federkonstante Rückstellfeder
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E_1	N/mm ²	Elastizitätsmodul elastische Verformung FGL
E_A	N/mm ²	Elastizitätsmodul Austenit

FORMELZEICHEN	EINHEIT	BEDEUTUNG
E_M	N/mm ²	Elastizitätsmodul Martensit
E_{Stahl}	N/mm ²	Elastizitätsmodul Rückstellfeder
E_T	N/mm ²	Elastizitätsmodul pseudoplastische Verformung FGL
F	N	Kraft
F_A	N	Federkraft FGL-Feder im Austenitzustand
F_M	N	Federkraft FGL-Feder im Martensitzustand
F_R	N	Restdruckkraft
F_{Stahl}	N	Federkraft Rückstellfeder
$F_{Stahl\ max}$	N	Belastungsgrenze Rückstellfeder
H	m	Hubweite Aktor
$H(s)$	–	Übertragungsfunktion im Bildbereich
H'	m	Hub in Abhängigkeit einer Restdruckkraft
I	A	elektrischer Strom
I_y	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment in y-Richtung
M	Nm	Drehmoment
M_f	°C	Ende Martensitumwandlung
M_s	°C	Beginn Martensitumwandlung
P	W	Heizleistung
P_1	–	Arbeitspunkt Aktor Martensitzustand
P_2	–	Arbeitspunkt Aktor Austenitzustand
ΔP	W	Schwankungsbereich Leistung
P_{max}	W	maximale Heizleistung
P_{min}	W	minimale Heizleistung
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	–	Widerstand allgemein
R_α	K/W	Wärmeübergangswiderstand
$R_{\alpha AW}$	K/W	Wärmeübergangswiderstand Aluminium-Wasser
$R_{\alpha KW}$	K/W	Wärmeübergangswiderstand Kupfer-Wasser
$R_{\alpha LK}$	K/W	Wärmeübergangswiderstand Luft-Kupfer
R_{konst}	K/W	konstanter Anteil Widerstand Luftspalt
R_{KS}	K/W	Restwiderstand geschlossener Luftspalt
R_λ	K/W	Wärmeleitwiderstand
$R_{\lambda K}$	K/W	Wärmeleitwiderstand Kupfer

FORMELZEICHEN	EINHEIT	BEDEUTUNG
---------------	---------	-----------

$R_{\lambda K1-K3}$	K/W	Wärmeleitwiderstand durch Kupferstück 1-3
$R_{\lambda L}$	K/W	Wärmeleitwiderstand Luft
R_{max}	K/W	maximaler Widerstand Luftspalt
R_{min}	K/W	minimaler Widerstand Luftspalt
R_{th}	K/W	thermischer Widerstand allgemein
$R_{th}(T1)$	K/W	thermischer Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur T1
R_V	K/W	thermischer Verlustwiderstand
R_{var}	K/W	variabler Anteil Widerstand Luftspalt
R_{VK}	K/W	Verlustwiderstand Kupferkeil
R_{VQ}	K/W	Verlustwiderstand Wärmequelle
R_{VS}	K/W	Verlustwiderstand Wärmesenke
R_Z	K/W	Ersatzwiderstand Luftspalt
T	°C	Temperaturniveau
ΔT	K	Temperaturdifferenz
ΔT_A	K	Ausgangstemperaturdifferenz
ΔT_E	K	Eingangstemperaturdifferenz
T_O	°C	obere Temperaturgrenze
T_U	°C	untere Temperaturgrenze
U	V	Spannung
V	N	Vorspannung Federaktor
α	W/m ² ·K	Wärmeübergangskoeffizient
ϵ	–	Dehnung
ϵ_{el}	–	elastische Dehnung
ϵ_{pp}	–	pseudoplastische Dehnung
η	m	Durchbiegung
η'	–	Neigung
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz
σ	N/m ²	Spannung
τ	s	Zeitkonstante
Φ	V	elektrisches Potential

Abkürzungsverzeichnis

EPP - Expandiertes Polypropylen

FG - Formgedächtnis

FGE - Formgedächtniseffekt

FGL - Formgedächtnislegierung

KFZ - Kraftfahrzeug

Abbildungsverzeichnis

1.1	Volumenspezifische Arbeitsdichten verschiedener Aktorprinzipien	1
1.2	Temperaturhysterese der Phasenumwandlung	2
1.3	Spannungsabhängigkeit	3
1.4	Kristallgitterstrukturen der verschiedenen Materialphasen	3
1.5	Pseudoplastizität	4
1.6	Einwegeffekt	5
1.7	Pseudoelastischer Effekt	5
1.8	Unterdrücktes Formgedächtnis	6
2.1	Funktionsweise einer Heatpipe	8
2.2	steuerbare Heatpipe	9
2.3	Funktionsprinzip Rotationswärmeübertrager	10
2.4	Stent zum Weiten eines Blutgefäßes	11
2.5	Sperrmechanismus eines Toasters	12
2.6	Kugelventil eines Verbrühschutzes	12
3.1	Veranschaulichung der Zielstellung	13
4.1	Ausgangsmodell der Wärmebrücke	16
4.2	erweitertes Modell der Wärmebrücke	17
4.3	Aufschlüsselung Widerstand Luftspalt	17
4.4	Zusammengefasstes Ersatzschaltbild der Wärmebrücke	19
4.5	Hub in Abhängigkeit der Temperatur	21
4.6	Geometrie Kupferkeil	22
4.7	Ersatzschaltung für Luftspalt und Kupferkeil	23
4.8	Temperaturverlauf Kupferkeil	23
4.9	neues Modell Wärmesenke	25
5.1	Wärmebrücke	29
5.2	Aufbau FGL-Aktor	30
5.3	Kennlinien Federaktor	31
5.4	Arbeitszyklus Aktor	32
5.5	Modell Federblatt	33
5.6	Beeinflussung Aktorhub	35
5.7	Variablen zur Modellierung des Aktors	36
5.8	Restkraft in Abhängigkeit des Hubes	37
6.1	Schema Versuchsaufbau	38
6.2	Signalverlauf erster Versuch	39

6.3	Signalverlauf zweiter Versuch	40
6.4	Vergleich: Experiment - Modell	41
A.1	thermisches Ersatzschaltbild	i
C.2	Variablen der Modellierung	iv
C.3	Variablen der Modellierung	vi

Tabellenverzeichnis

4.1	Analogien zwischen Thermodynamik und Elektrotechnik	15
4.2	Übersicht Wärmewiderstände	16
5.1	Parameter und Ergebnisse der Auslegung des Aktors	34
6.1	Vergleich: aufgenommene Zeitkonstante - maximale Zeitkonstante	41

1 Einleitung und Motivation

1.1 Motivation

Grundlage jedes wertschöpfenden Prozesses ist der Einsatz natürlicher Ressourcen. Da diese jedoch nur begrenzt zu Verfügung stehen, ist der sparsame Umgang gerade in den letzten Jahren zu einem wichtigen wirtschaftlichen Thema geworden. Unternehmen sind heute mehr denn je gezwungen ihre Produktion energie- und ressourceneffizient zu gestalten.

Ein Ansatz zur Steigerung der Effizienz ist das Einsetzen von Aktoren mit hohen Arbeits- bzw. Leistungsdichten. Ziel hierbei ist es, dass die erbrachte Arbeit im Verhältnis zu eingesetzter Masse, Fläche oder Volumen möglichst groß ist. Die nachfolgende Tabelle stellt die Leistungsdichten verschiedener Aktorprinzipien dar.

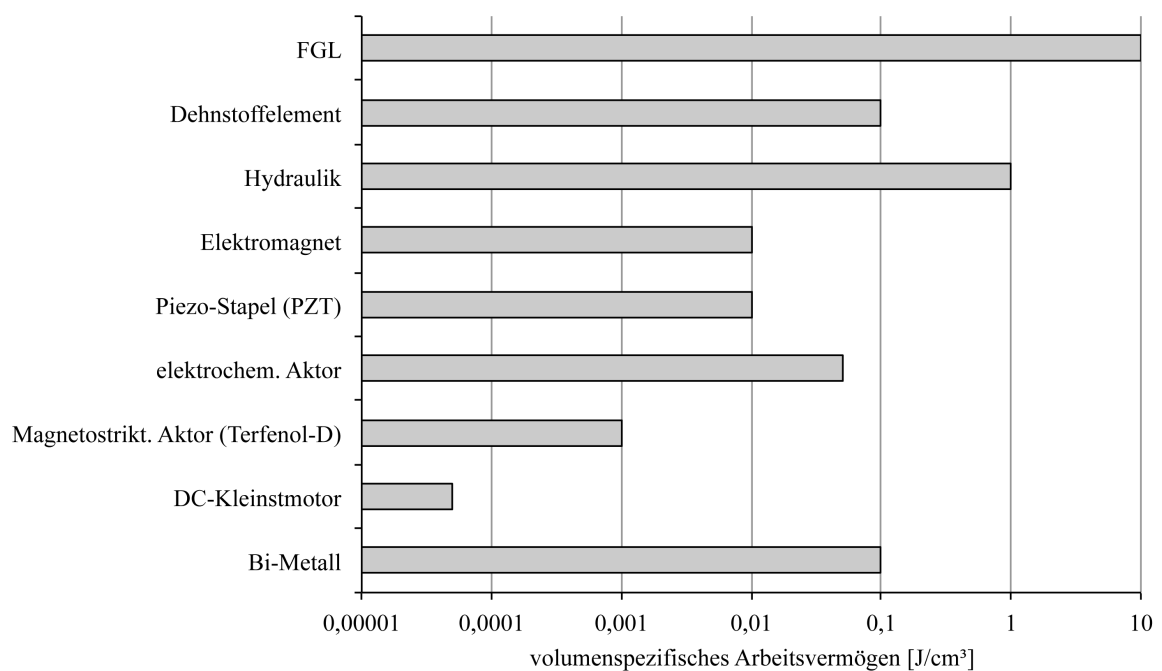


Abbildung 1.1: Volumenspezifische Arbeitsdichten verschiedener Aktorprinzipien [Jun09]

Formgedächtnisaktoren besitzt im Vergleich zu anderen Aktoren eine sehr hohe Arbeitsdichte. Dies ist eine grundlegende Voraussetzung für die Entwicklung hochintegrierter Anwendungen. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Formgedächtnismaterialien liegt in der Eigenschaft auf spezielle Umwelteinflüsse zu reagieren. Dadurch können Self-Sensing Aktoren entwickelt werden, welche selbstständig auf eine Führungsgröße reagieren. So werden z.B. thermische Formgedächtnislegierungen durch eine definierte Temperaturänderung beeinflusst. Dies macht sie vor allem für die Verwendung in thermischen Prozessen interessant.

Hinzu kommt, dass die Verformung allein durch die eingebrachte Wärme ausgelöst wird. Dadurch ist es möglich eine energieautarke Aktorik mit hoher Zuverlässigkeit zu entwickeln. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Aktorik zur Regulierung eines thermischen Prozesses entworfen, deren Funktionsweise auf diesen besonderen Materialeigenschaften basiert.

1.2 Der Formgedächtniseffekt

Der Formgedächtniseffekt bezeichnet die Eigenschaft eines Materiales, bei Einwirkung einer bestimmten physikalischen Größe in seine Ausgangsform zurückzukehren. Die Aktivierungsgrößen können verschiedenster Natur sein. So kann die Formumwandlung beispielsweise durch ein magnetisches Feld oder durch einen Lichtimpuls ausgelöst werden. In den meisten Fällen ist eine vorherige Konditionierung des Materials notwendig um eine Grundform einzuprägen, die das Werkstück bei einer Umwandlung annimmt. Viele dieser aktiven Materialien sind immer noch Gegenstand der aktuellen Werkstoffforschung und bei weitem noch nicht vollständig erschlossen. Der thermische Formgedächtniseffekt wurde 1962 entdeckt und ist aufgrund langjähriger Untersuchung für erste praktische Anwendungen am besten geeignet.

Er zeigt sich dadurch, dass ein im Tieftemperaturzustand verformtes Bauteil bei Erwärmung über die Umwandlungstemperatur in seine Ausgangsform zurückkehrt. Die Umwandlung beruht auf einer Veränderung der Kristallgitterstruktur von einem martensitischen in ein austenitisches Gefüge [Sch09]. Nachfolgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der Phasenumwandlung von der Materialtemperatur.

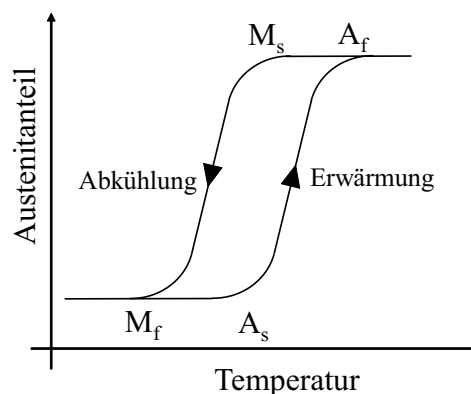


Abbildung 1.2: Temperaturhysterese der Phasenumwandlung [Sch09]

Bei der Erwärmung des Materials beginnt die Phasenumwandlung in den austenitischen Zustand bei der Temperatur A_s (Austenit-start). Mit Erreichen der Temperatur A_f (Austenit-finish) ist die Phasenumwandlung abgeschlossen. Kühlt sich das Material wieder ab beginnt

die Rückumwandlung in den martensitischen Zustand bei der Temperatur M_s (Martensit-start). Sie ist abgeschlossen wenn die Temperatur des Werkstoffs unter M_f (Martensit-finish) abgesunken ist. Die Temperaturhysterese zwischen den Phasenumwandlungen beträgt je nach Materialzusammensetzung 10-30 K. Bei Krafteinwirkung steigen die Materialumwandlungstemperaturen proportional zur anliegenden mechanischen Spannung an (Abbildung 1.3).

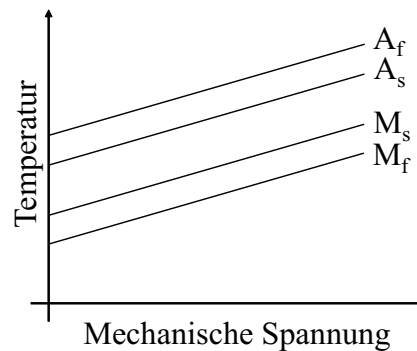


Abbildung 1.3: Spannungsabhängigkeit der Phasenumwandlungstemperaturen [Sch09]

Die Ursache für dieses spezielle Werkstoffverhalten liegt in den mikroskopischen Vorgängen im Material. Während die Legierung in der Hochtemperaturphase (Austenit) ein kubisch raumzentriertes Kristallgitter besitzt, liegt in der Niedertemperaturphase eine monokline bzw. verzerrt orthorhombische Struktur vor (Abbildung 1.4).

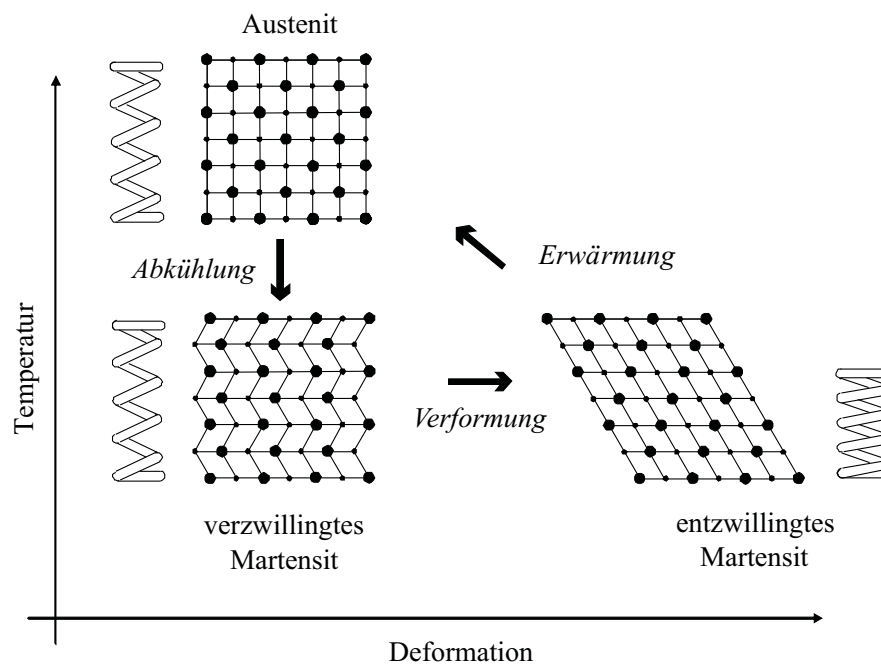


Abbildung 1.4: Kristallgitterstrukturen der verschiedenen Materialphasen [Sch09]

Bei der Phasenumwandlung in den Martensitzustand (Abkühlung) bilden sich verzwillingte Kristallgitterstrukturen aus, welche bei Einwirkung einer mechanischen Spannung leicht

umklappen. Die für diesen Vorgang nötige Spannung wird als Amplitudenspannung σ_A bezeichnet. Bei geringerer Belastung kommt es zu rein elastischen Verformungen. In diesem Bereich besitzt das Material das E-Modul E_1 . Steigt die Belastung über die Amplitudenspannung σ_A , entsteht der Eindruck eines Überschreitens der Streckgrenze, obwohl nur eine Verschiebung der leicht beweglichen Zwillingsgrenzen stattfindet. Das Material besitzt in diesem Plateau-Bereich ein geringeres E-Modul, genannt Tangentenmodul E_T . Die einsetzende pseudoplastische Verformung ϵ_{pp} kann bei NiTi-Legierungen bis zu 8 % betragen und bleibt nach Entlastung des Materials bestehen. Lediglich die elastische Verformung ϵ_{el} bis zur Amplitudenspannung geht zurück. Bei einer Belastung über das Martensitplateau hinaus, steigt die Festigkeit und somit das E-Modul des Materials wieder an. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve verhält sich ab diesen Punkt ähnlich der eines vergüteten Stahls. Wird das Material entlastet, bleibt die gesamte pseudoplastische Verformung erhalten. Solch ein Belastungszyklus ist in nachfolgender Abbildung schematisch dargestellt.

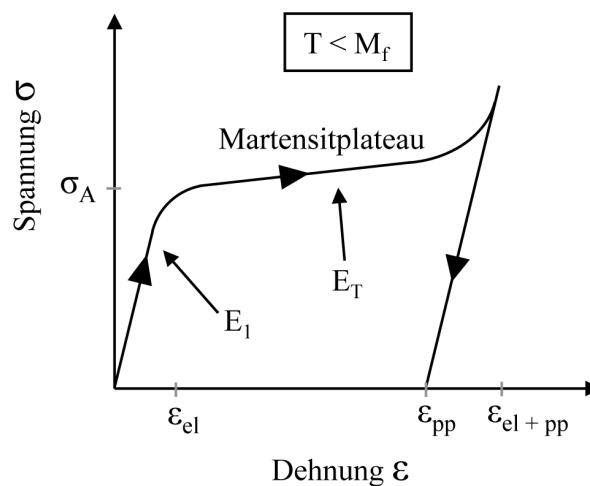


Abbildung 1.5: Pseudoplastischer Effekt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm [Jun08]

1.2.1 Einwegeffekt

Wird dieser verformte Werkstoff thermisch aktiviert, kehrt er in seine eingeprägte Ausgangsform zurück. Bei diesem Vorgang kann mechanische Arbeit verrichtet werden. Die Rückverformung beginnt ab einer Temperatur von A_s . Eine vollständige Formrückkehr ist jedoch erst ab Erreichen von A_f möglich (Abbildung 1.6). Diese Materialeigenschaft wird als Einweg- oder Memory-Effekt bezeichnet.

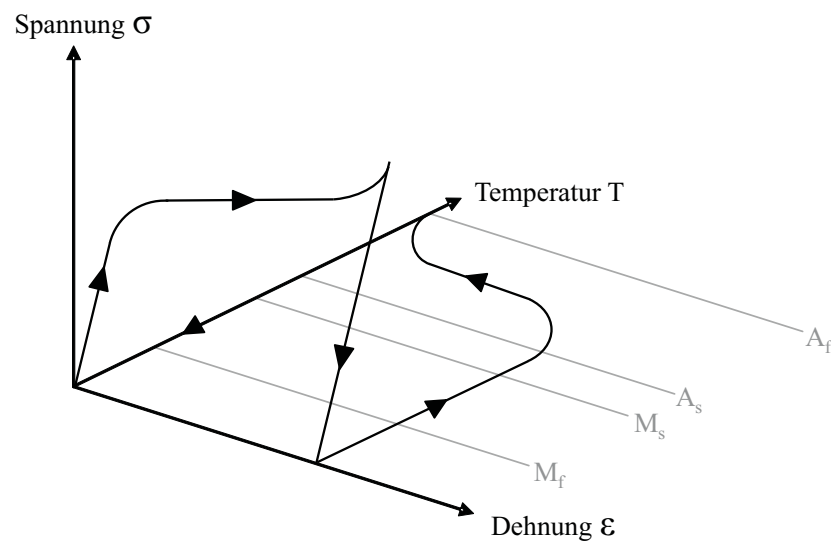


Abbildung 1.6: Einwegeffekt im Spannungs-Dehnungs-Temperatur-Diagramm [Jun08]

1.2.2 Pseudoelastizität

Wird die Legierung im Austenitzustand mechanisch belastet, erhöhen sich die Phasenumwandlungstemperaturen. Steigt nun aufgrund der anliegenden Spannung die Umwandlungstemperatur M_s über die Materialtemperatur, kommt es zu einer spannungsinduzierten Martensitbildung. Das Material kann in diesem Zustand stark verformt werden. Lässt die Belastung nach, sinkt M_s wieder unter die Materialtemperatur und es bildet sich die austenitische Kristallstruktur aus. Bei diesem Prozess nimmt das Werkstück wiederum seine Ausgangsform an. Dieses Verhalten einer FGL wird als Pseudoelastizität bezeichnet. Es ergibt sich die in Abbildung 1.7 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Kurve.

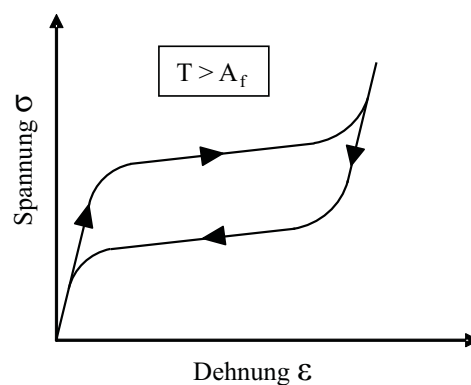


Abbildung 1.7: Pseudoelastischer Effekt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm [Sch11]

1.2.3 Unterdrücktes Formgedächtnis

Wird aufgrund von äußeren Einflüssen die vollständige Umwandlung des Materials verhindert, entsteht der Effekt des unterdrückten Formgedächtnisses. Durch das Blockieren der Phasenumwandlung kommt es zur Spannungsbildung innerhalb des Materials. Ursache dafür ist die Spannungsdifferenz zwischen der austenitischen und der martensitischen Phase bei gleicher Dehnung. Die so entstehende Kraft kann genutzt werden, um Druck auf eine Fläche aufzubauen. Abbildung 1.8 zeigt den Effekt des unterdrückten Formgedächtnisses.

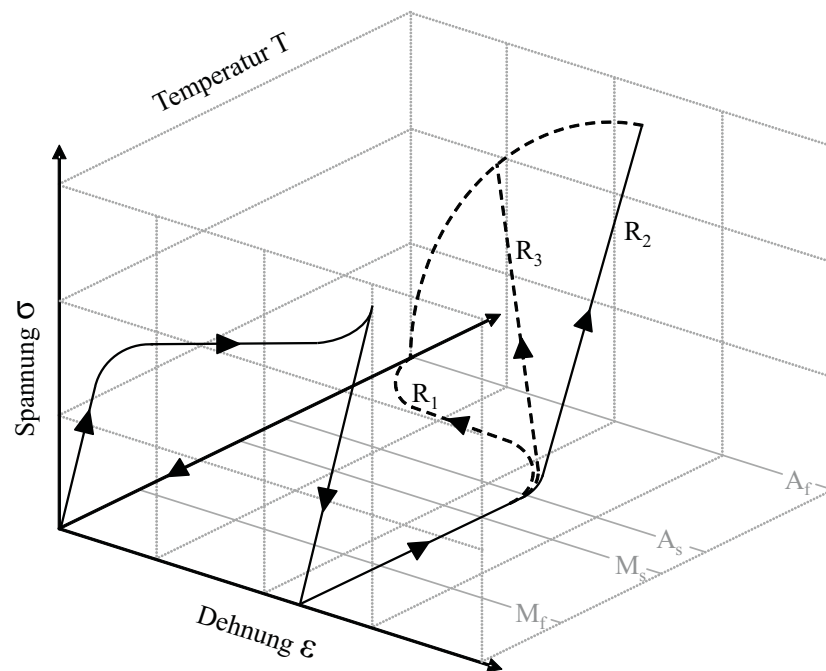


Abbildung 1.8: Unterdrücktes Formgedächtnis im Spannungs- Dehnungs- Temperatur-Diagramm

Dabei wurde das Material in der martensitischen Phase pseudoplastisch verformt und anschließend aktiviert. Bei einer normalen Umwandlung, ohne gegenhaltende Kraft, verläuft die Rückverformung entlang der Linie R_1 . Bei einer Blockierung der Formumwandlung verläuft die Kraft entlang der Linie R_2 . In der Realität besitzt die Blockade selbst eine Steifigkeit, lässt also eine gewisse Formänderung des Materials zu. Die Umwandlung verläuft entlang der Linie R_3 . Durch die entstehende mechanische Spannung steigen die Umwandlungstemperaturen (siehe 1.3).

1.3 Gegenstand der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer intelligenten Wärmebrücke. Diese soll, ohne externe Ansteuerung, die Temperatur einer Wärmequelle regulieren. Dabei wird auf dem schaltbaren Wärmewiderstand aufgebaut, welcher im vorangegangenen Praktikum des Autors [Czo11] entwickelt wurde. Ansatzpunkt für die selbstständige Regelung ist die Verwendung einer thermischen Formgedächtnislegierung, wie sie im Abschnitt 1.2 beschrieben wurde. Dabei soll die thermisch induzierte Formänderung genutzt werden, um die Wärme der Quelle gesteuert abzuleiten.

Im Verlauf der Arbeit wird eine Lösungsvariante entworfen und ein entsprechender Demonstrator aufgebaut. Es wird ein Modell aufgestellt, welches die Schaltschwellen und Temperaturverläufe der Wärmebrücke beschreibt. Weiterhin wird untersucht, ob und unter welchen Bedingungen ein Schwingen dieses Systems zu erwarten ist. Abschließend wird der Demonstrator auf seine Funktion getestet und das Modell überprüft.

Um einen Einstieg in die nachfolgende Arbeit zu bekommen, wird im Anschluss der aktuelle Stand der Technik betrachtet. Es werden Mechanismen zum Regulieren von Wärmeströmen sowie gängige Varianten zum Aufbau von energieautarken Aktoren mit Formgedächtnislegierungen vorgestellt.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Regulierbarer Wärmewiderstand

Bis vor kurzer Zeit stand die Schaffung einer guten Wärmeisolation bzw. einer guten Wärmeleitung für verschiedenste technische Anwendungen im Fokus der Forschung. Die Kombination beider Eigenschaften zur gezielten Steuerung eines Wärmeflusses ist ein Gebiet mit dem sich erst seit jüngster Zeit intensiv befasst wird. Aufgrund dieser Ausgangslage gibt es viele Möglichkeiten eine gute Wärmeleitung oder auch Isolation zu realisieren, jedoch kaum Anwendungen zum geregelten Wärmetransport.

2.1.1 Steuerbare Heatpipes

Ein Wärmerohr besteht in den meisten Fällen aus einem Rohr mit einem eingeschlossenen Transportmedium, welches an der Wärmequelle verdampft und an der Wärmesenke kondensiert. Dadurch entsteht ein großer Wärmestrom durch einen verhältnismäßig kleinen Querschnitt. Die Abbildung 2.1 stellt den Transportvorgang schematisch dar.

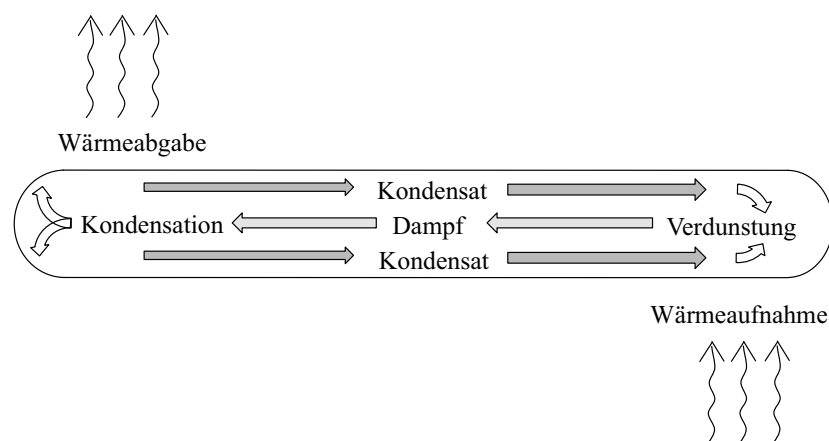


Abbildung 2.1: Funktionsweise einer Heatpipe [Gro06]

Die Arbeitstemperatur kann durch die gezielte Wahl des eingeschlossenen Stoffes variiert werden. Es sind Arbeitspunkte bei Temperaturen von wenigen Kelvin bis hin zu mehreren tausend Kelvin möglich. Der Wärmewiderstand einer solchen Heatpipe kann nicht mit dem der Wärmeleitung durch einen Festkörper verglichen werden. Die entstehende Temperaturdifferenz ist nicht proportional zum fließenden Wärmestrom. Dies ist durch den Mechanismus der Wärmeübertragung bedingt. Im Normalfall beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Eintritts- und Austrittspunkt der Wärme weniger als ein Kelvin.

Bei einer steuerbaren Heatpipe werden zwei einzelne Wärmerohre mit einem gut leitenden Metallkörper verbunden. Nun kann durch Veränderung der Kontaktfläche zwischen Heatpipe und Metallbrücke der Gesamtwiderstand der Anordnung beeinflusst werden [Mül09].

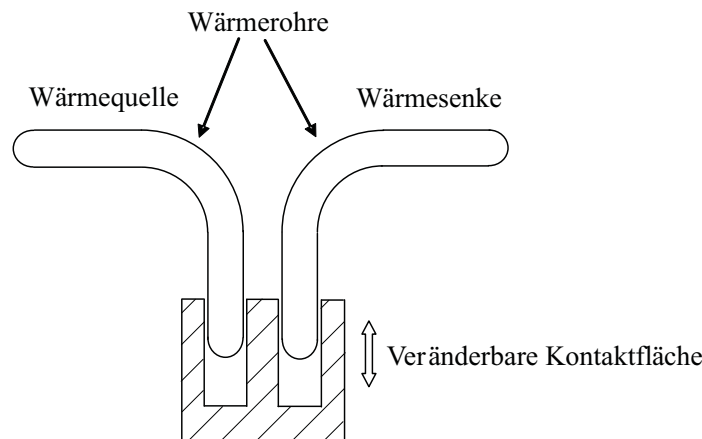


Abbildung 2.2: steuerbare Heatpipe [Mül09]

Eine zweite Möglichkeit zur Regulierung des Wärmeflusses ist das Einbringen eines Ventils oder einer Drossel in das Wärmerohr. Diese können extern angesteuert werden und somit den Wärmetransport innerhalb einer Heatpipe beeinflussen [Mül09].

Geplantes Einsatzgebiet dieser steuerbaren Wärmebrücke ist der Kfz-Bereich. Dort soll sie zur gezielten Unterstützung des Thermomanagement eingesetzt werden. So soll z. B. Wärme, welche normalerweise mit dem Abgas verloren geht, zum Aufheizen von anderen Fahrzeugteilen verwendet werden. Die steuerbare Heatpipe bietet aufgrund ihres geringen Gewichtes sowie auch Volumens eine gute Lösung für den Fahrzeugbereich. Ihre Herstellung ist jedoch recht aufwendig und damit kostenintensiv. Für Anwendungen in großen Stückzahlen ist die Heatpipe damit nicht geeignet.

2.1.2 Rotationswärmeübertrager

Der Rotationswärmeübertrager, auch Rotationswärmetauscher oder Wärmerad genannt, ermöglicht es, die Wärme aus einem Luftstrom in einen anderen zu übertragen. Dazu werden beide Luftströme, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, durch eine rotierende Speichermasse geleitet. Diese besteht aus vielen kleinen Kanälen aus metallischer Folie, welche parallel zur Rotationsachse den Speicher durchlaufen. Werden diese Kanäle von der Abluft durchströmt, wird die Wärme aus der Luft durch die Metallfolie aufgenommen. Dreht sich der Rotor weiter, erreichen die erwärmten Kanäle den Bereich, in dem die Frischluft durch den Rotor geleitet wird. Dort wird die gespeicherte Wärme wieder an den Luftstrom abgegeben.

Die Frischluft wird erwärmt. Mit der Veränderung der Drehzahl des Rotors kann die übertragene Wärmeenergie stufenlos eingestellt werden. Somit ist eine Einstellung des Wärmeübergangswiderstandes zwischen der zu- und der abgeführten Luft möglich. Gebräuchliche Rotordurchmesser reichen von 40 cm bis hin zu 6 m. Der Rotationswärmetauscher besitzt von allen Bauweisen von Wärmetauschern die höchsten Übertragungsraten von bis zu 85 %. [Umw]

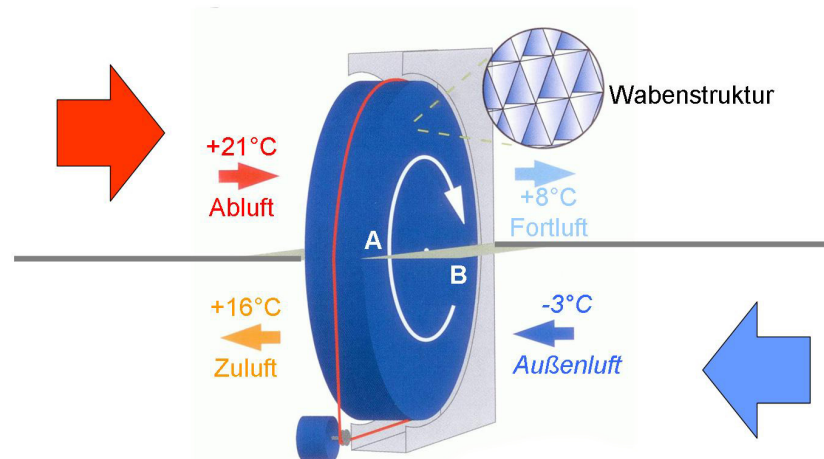


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip Rotationswärmeübertrager [Sch]

2.2 Energieautarke Formgedächtnisaktoren

Aufgrund des fortgeschrittenen Standes der Forschung auf dem Gebiet der thermischen Formgedächtnislegierungen gibt es bereits einige praktische Anwendungen in Form energieautarker Aktoren. Im folgenden Abschnitt werden einige ausgewählte Beispiele erläutert, um einen Überblick über aktuelle Anwendungsgebiete zu schaffen. Bei den Aktoren kann zwischen den Aktoren mit einmaliger Stellbewegung und denen mit wiederholbarer Stellbewegung unterschieden werden. Im ersten Beispiel wird ein Aktor mit einmaliger Hubbewegung betrachtet. Die weiteren Beispiele beschreiben Anwendungen mit wiederholbarem Hub. Alle vorgestellten Aktoren arbeiten energieautark d. h. sie benötigen keine externe Energieversorgung.

2.2.1 Stent

Ein Stent ist eine in der Medizintechnik verwendete Gefäßstütze zum Weiten von Blutgefäßen und zur Vorbeugung eines Gefäßverschlusses (Abbildung 2.4). Sie werden in der modernen Medizintechnik aus Formgedächtnislegierung gefertigt. Das hat mehrere Vorteile. Zum einen besitzt die verwendete Legierung eine hohe Bioverträglichkeit. Dies ist durch

die stark passivierende TiO_2 Oberfläche zu erklären, welche eine Diffusion der Nickelatome verhindert. Damit ist das Material besser für den menschlichen Körper verträglich, da eine Korrosion des Metalls unterbunden wird. Die zweite Besonderheit bei der Verwendung einer FGL ist die eigenständige Expansion des Implantates bei Erwärmung auf Körpertemperatur. Dies vereinfacht ein Einsetzen der Gefäßstütze, da diese zu dem Zeitpunkt sehr geringe Abmaße besitzt. Weiterhin wird dadurch auch das Verletzungsrisiko bei der Implantation minimiert [Haa09].

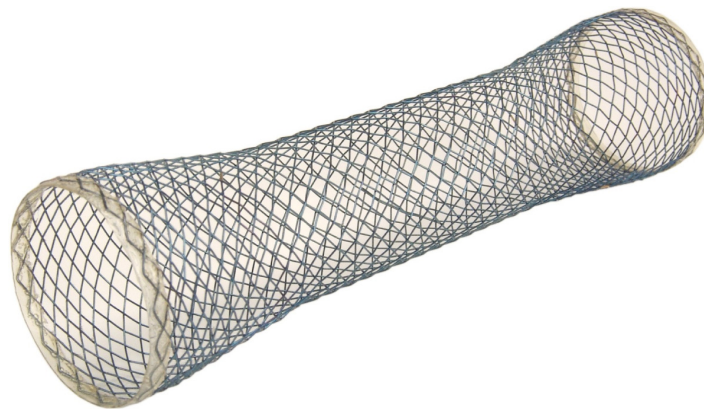


Abbildung 2.4: Stent zum Weiten eines Blutgefäßes [Haa09]

2.2.2 Sicherheitselement im Toaster

Bei bestimmten Serien von Toastern wird eine Kunststoffabdeckplatte angebaut, welche als Staubschutz in Betriebspausen dient. Da über den Aufnahmeschlitz für das Toast nach dem Betrieb des Toasters immer noch Temperaturen von über 140°C auftreten können, ist es notwendig ein Herabsenken dieser Abdeckung im heißen Zustand zu verhindern. Aus diesem Grund wird ein Sicherheitsmechanismus basierend auf einem Formgedächtnisaktor verbaut. Dieser besteht, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, aus zwei Federn, welche einen Verschlussriegel bewegen. Der Aktor wird durch die Temperatur des Toasters aktiviert und verhindert ein Einrasten der Abdeckung. Erst nach dem Absinken der Temperatur in einen gefahrlosen Bereich lässt sich die Abdeckung schließen. Das genaue Funktionsprinzip des Aktors wird in nachfolgenden Kapiteln ausführlich erläutert.

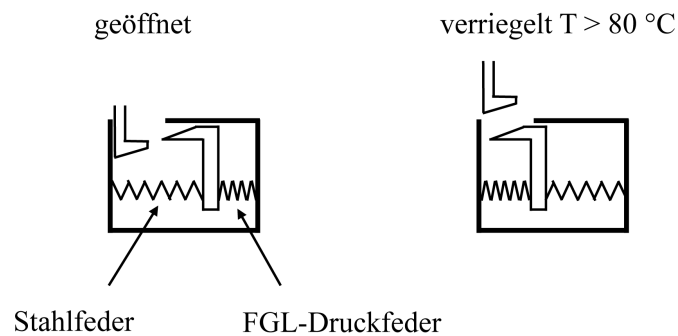
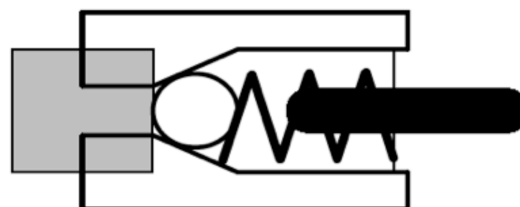


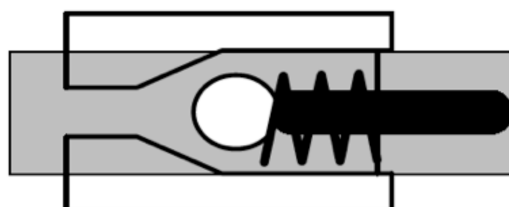
Abbildung 2.5: Sperrmechanismus eines Toasters [Nuß95]

2.2.3 Verbrühschutz im Brausekopf

Der Verbrühschutz ist ein Sicherheitsventil, welches, wie der Name schon sagt, vor Verbrennungen durch heißes Wasser schützen soll. Dabei unterbricht das Ventil den Wasserstrom bei Überschreiten einer Grenztemperatur. Es besteht aus zwei gegenüber angeordneten Druckfedern, einer Stahl- und einer FGL-Feder, welche eine Kugel bewegen (Abbildung 2.6). Diese Kugel öffnet bzw. schließt eine Düse. Bei Überschreitung der Grenztemperatur dehnt sich die FGL-Feder aus und öffnet das Bypassventil. Der heiße Wasserstrom wird somit am Austritt vorbeigeführt.



a) Bypass-Ventil geschlossen



b) Bypass-Ventil geöffnet

Abbildung 2.6: Kugelventil eines Verbrühschutzes [Nuß95]

Dieses Sicherheitsventil ist in einigen US-Bundestaaten bereits für Krankenhäuser und Hotels vorgeschrieben.

3 Zielstellung und Lösungsansatz

3.1 Zielstellung

Im Rahmen der Arbeit wird eine selbstregulierende Wärmebrücke konstruiert. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie ohne externe Ansteuerung die Temperatur einer Wärmequelle regulieren kann. Es soll überprüft werden ob und wie gut ein solches System aufgebaut werden kann. Dazu wird ein Demonstrator entworfen, welcher unter definierten Randbedingungen die Funktion nachweisen soll.

Der Mechanismus einer selbstregulierenden Wärmebrücke wird in dieser Arbeit an dem konkreten Beispiel des Demonstrators betrachtet. Dazu werden realistische Ausgangsbedingungen und Funktionsanforderungen aufgestellt, d. h. es werden Zielparаметer festgelegt, welche die Wärmebrücke im Betrieb einhalten soll.

Ausgangspunkt bei der Wahl der Grenzparameter ist der geplante Einsatz an einer Wärmequelle mit variierender Heizleistung. Diese darf ein definiertes Temperaturintervall nicht verlassen. Der Schwankungsbereich der Heizleistung ist bekannt.

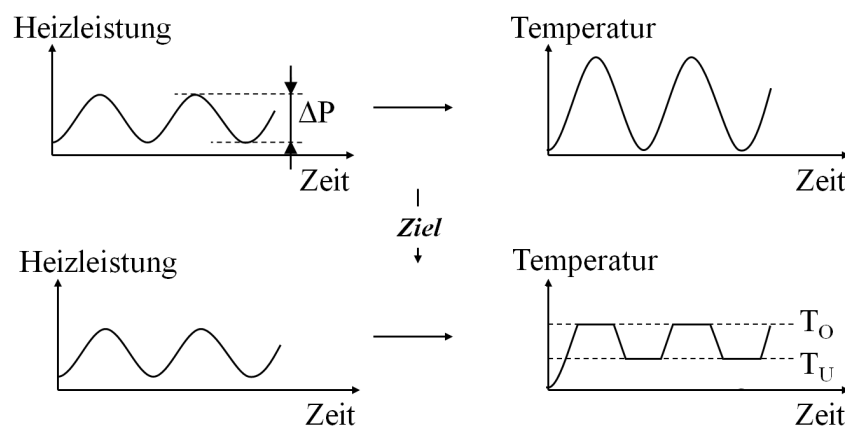


Abbildung 3.1: Veranschaulichung der Zielstellung

Folgende Rahmenbedingungen werden angesetzt (siehe Abbildung 3.1):

- Variation Heizleistung ΔP : 25 W
- Mindesttemperatur Wärmequelle T_U : 50 °C
- Maximaltemperatur Wärmequelle T_O : 80 °C

3.2 Lösungsansatz

Um die Wärme der Quelle gezielt zu beeinflussen, wird sie über einen steuerbaren Widerstand an eine Wärmesenke angeschlossen. Steigt das Temperaturniveau der Quelle an, verringert sich der Durchgangswiderstand zur Senke und der abfließende Wärmestrom wird größer. Dadurch sinkt die Temperatur an der Quelle wieder ab. Ist die Temperatur der Wärmequelle zu gering, vergrößert sich der Durchgangswiderstand. Es kann weniger Wärme abfließen und das Temperaturniveau der Quelle wird wieder angehoben.

Der Steuervorgang wird mithilfe eines Aktors aus einer thermischen Formgedächtnislegierung realisiert. Dieser reagiert auf die Temperatur der Quelle und induziert eine Bewegung, welche den Widerstand zur Senke verändert.

Der Aufbau des regulierbaren Widerstandes, sowie der Wärmequelle und der Senke werden aus der vorangegangenen Praktikumsarbeit übernommen [Czo11]. In dem Aktor wurde eine Spiralfeder aus Formgedächtnislegierung (kurz FGL) verwendet um eine Hubbewegung zu erzeugen. Das Aktorkonzept ist in dieser Arbeit neu, da die Wärme der Quelle zur Aktivierung des Materials verwendet wird. Eine Übertragung der Wärme in diese Feder ist nicht zu realisieren, ohne eine große zeitliche Verzögerung zu erhalten. Dies würde dazu führen, dass die Temperatur der Quelle überschwingt, bevor der Aktor reagiert. Das Temperaturintervall der Wärmequelle wäre damit sehr groß. Weitere Informationen zum Aufbau des Wärmewiderstandes sind in [Czo11] nachzulesen.

4 Thermodynamische Modellierung

4.1 Ziel des Modells

Ziel der Modellbildung ist die Beschreibung der Temperaturverläufe in der Wärmebrücke. Aufbauend darauf soll das Temperaturintervall in welchem die Wärmequelle geregelt wird bestimmt werden. Abschließend wird untersucht, ob ein Schwingen des Systems möglich ist.

4.2 Erläuterungen zum Modellaufbau

Der nachfolgende Modellentwurf ist in zwei Teile gegliedert. Der erste Abschnitt beschreibt den Weg zur Ermittlung der Temperaturniveaus innerhalb der Wärmebrücke in Abhängigkeit der Wärmewiderstände. Er ist analytisch aufgebaut. Im zweiten Teil wird auf empirischem Weg die Breite des Luftspaltes bei gegebener Temperatur der Wärmequelle bestimmt. Die Kombination beider Teilmodelle ermöglicht die Bestimmung der Temperaturverläufe innerhalb der Wärmebrücke.

Die Betrachtungen bauen auf den Analogien zwischen der Elektrotechnik und der Thermodynamik auf. Thermische Prozesse können somit auf den Grundstromkreis zurückgeführt und erklärt werden. Tabelle 4.1 zeigt die verwendeten Analogien:

Tabelle 4.1: Analogien zwischen Thermodynamik und Elektrotechnik [Sch11]

Thermodynamik	Elektrotechnik
T - Temperatur	Φ - Potential
$\Delta\vartheta$ - Temperaturdifferenz	U - Spannung
\dot{Q} - Wärmestrom	I - Strom
R_{th} - thermischer Widerstand	R - elektrischer Widerstand
C_{th} - thermische Kapazität	C - elektrische Kapazität

In den folgenden Erläuterungen wird von verschiedenen Arten von Wärmewiderständen gesprochen. Zur Übersicht werden diese in Tabelle 4.2 kurz erklärt.

Tabelle 4.2: Übersicht Wärmewiderstände

Art des Widerstandes	Erläuterung
Wärmeleitwiderstand	Widerstand beim Durchgang durch eine Materialschicht.
Wärmeübergangswiderstand	Widerstand, beim Übergang an einer Grenzfläche zwischen Festkörper und Fluid.
Wärmedurchgangswiderstand	Widerstand beim Durchgang durch eine oder mehrere Materialschichten.

4.3 Temperaturniveau in Abhängigkeit der Wärmewiderstände

4.3.1 Aufbau des Modells

Ausgangspunkt der Modellbildung ist ein einfaches Netzwerk mit einer Wärmequelle, einer Senke, einem veränderbaren Widerstand zum Regulieren der Temperatur sowie einem Durchgangswiderstand an die Umgebung, über den der Verlustwärmestrom abfließt (Abbildung 4.1).

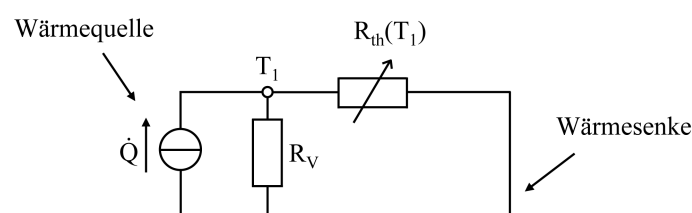


Abbildung 4.1: Ausgangsmodell der Wärmebrücke

Die Variable T_1 steht für die Temperatur der Wärmequelle. Diese wirkt sich unmittelbar auf den Widerstand zur Wärmesenke $R_{th}(T_1)$ aus. Steigt die Temperatur an, so wird der Widerstand geringer. Dadurch kann ein größerer Strom zur Wärmesenke fließen und die Temperatur der Quelle nimmt ab. Wird die Quelle zu kalt, vergrößert sich der thermische Widerstand zur Senke. Der fließende Wärmestrom nimmt ab und der an die Umgebung fließende Wärmestrom steigt. Dieser größere Strom durch den Übergangswiderstand an die Umgebung R_V bewirkt einen Anstieg der Temperaturdifferenz und hebt somit die Temperatur der Quelle wieder an. Die Umsetzung von Wärmequelle und Wärmesenke ist im Abschnitt 5.1 Aufbau der Wärmebrücke näher erläutert.

Um die Realität besser zu erfassen, werden die Leitwiderstände der Kupferstücke sowie deren Wärmekapazitäten in die Modellierung einbezogen. Somit können auch die dynamischen Vorgänge in dem System abgebildet werden. Es entsteht folgendes Modell:

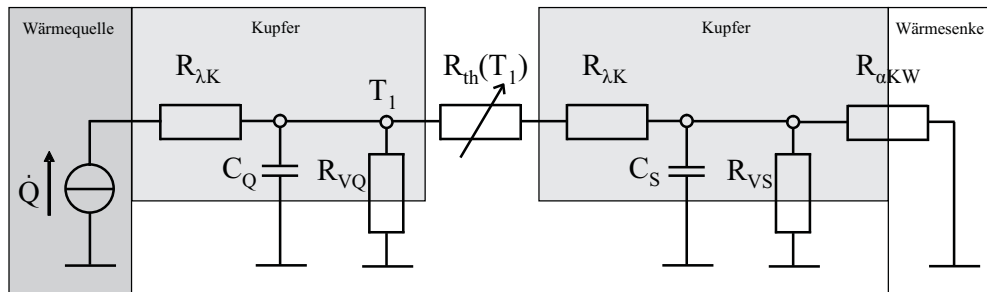


Abbildung 4.2: erweitertes Modell der Wärmebrücke

Die Leitwiderstände durch das Kupfer sind mit $R_{\lambda K}$ gekennzeichnet. Die Indizes Q und S stehen für Wärmequelle bzw. Wärmesenke. Der Verlustwiderstand aus Abbildung 4.1 wurde aufgeteilt in die Verluste an der Quelle R_{VQ} und die an der Senke R_{VS} . Die Wärmekapazitäten sind durch C_Q und C_V gekennzeichnet. Der Übergangswiderstand vom Kupfer zum Wasser an der Wärmesenke ist durch $R_{\alpha KW}$ beschrieben.

Um den Wärmeverlauf hinreichend genau beschreiben zu können, wird der veränderbare Widerstand $R_{th}(T_1)$ in Abbildung 4.3 genauer betrachtet.

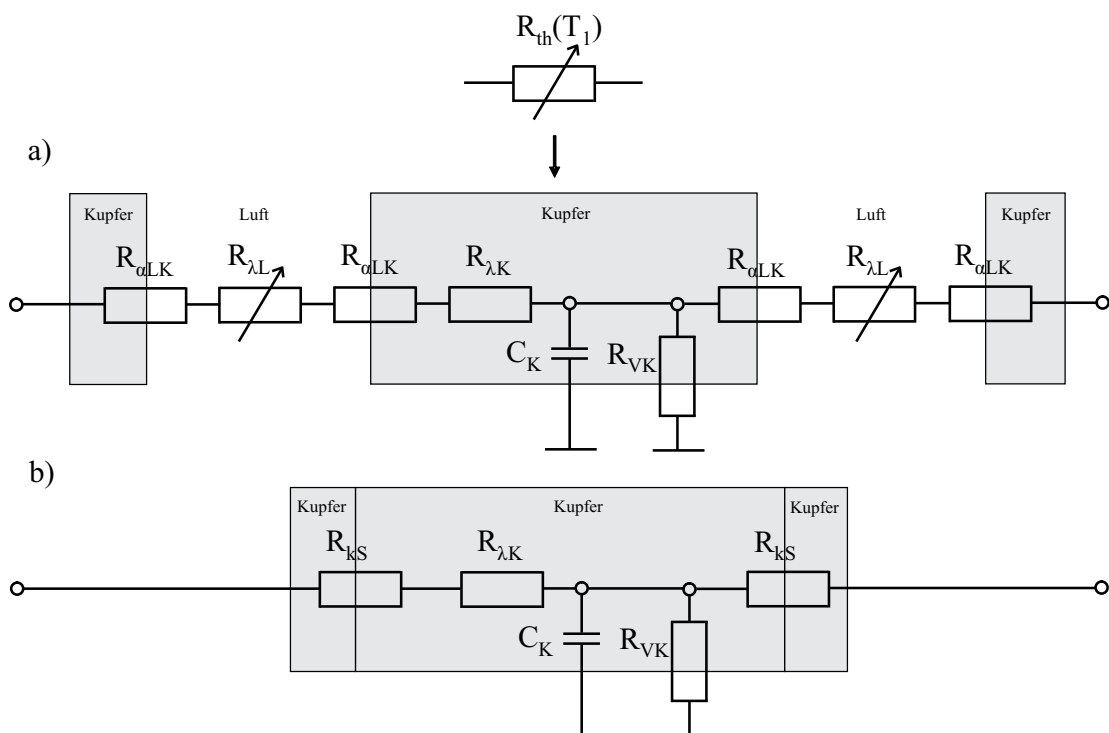


Abbildung 4.3: Aufschlüsselung Widerstand Luftspalt: a) Luftspalt vorhanden; b) direkter Kontakt der Kupferflächen

Das Schaltbild zeigt zwei Wege des Stromflusses zwischen denen je nach Temperatur gewechselt wird. Der obere Ast (a) stellt die Wärmewiderstände bei vorhandenem Luftspalt dar. Im unteren Ast (b) ist der Durchgangswiderstand bei direktem Kontakt der Kupferflächen abgebildet. Der Kupferkeil selbst besitzt eine Wärmekapazität C_K und einen Übergangswiderstand zur Umgebung R_{VK} durch den die thermischen Verluste abfließen.

Der Wärmeleitwiderstand durch die Luft $R_{\lambda L}$ variiert mit der Breite der Spalte, welche durch das Verschieben des Kupferkeils entstehen. Hinzu kommen die Übergangswiderstände zur Luft an den Oberflächen R_α sowie der Leitwiderstand im Kupferkeil. Ist der Keil direkt in der Aufnahme angesetzt, ist nur noch der Leitwiderstand durch den Keil vorhanden. Da die Kontaktflächen der Kupferteile nicht genau plan zueinander gefertigt werden können, bleibt an der Kontaktstelle ein Restwiderstand erhalten. Dieser ist mit R_{kS} gekennzeichnet.

4.3.2 Zusammenfassung des Modells

Im ersten Schritt werden die Widerstände der zwei Luftspalte betrachtet, welche in Reihe zu den Kapazitäten C_K und C_S liegen. Diese werden jeweils zu einem konstanten R_{konst} und einem variablen Anteil R_{var} zusammengefasst. Gemeinsam ergeben sie den Durchgangswiderstand R_Z , welcher jeweils zwischen zwei Wärmekapazitäten liegt.

$$R_Z = R_{konst} + R_{var} \quad (4.1)$$

Im konstanten Anteil wird der Widerstand beschrieben, welcher in jedem der beiden Zustände vorhanden ist. Er besteht aus den jeweiligen Leitwiderständen durch die Kupferabschnitte $R_{\lambda K}$.

$$R_{konst} = R_{\lambda K1} + R_{\lambda K2} + R_{\lambda K3} \quad (4.2)$$

Der variable Anteil beinhaltet die Widerstände, welche durch den Luftspalt entstehen. Im Fall b (Abbildung 4.3) besteht er nur aus den Restwiderständen zwischen den Kontaktflächen der Kupferteile R_{KS} . In diesem Zustand ist der variable Anteil minimal. Sobald ein Luftspalt vorhanden ist, setzt sich der Widerstand aus den Wärmeübergangswiderständen zwischen Kupfer und der Luft $R_{\alpha LK}$ sowie die Leitwiderständen durch die Luft $R_{\lambda L}$ zusammen. Der variable Anteil kann somit folgendermaßen beschrieben werden:

$$R_{var} = \begin{cases} 2 \cdot R_{KS} & \text{für } l = 0 \\ 2 \cdot (R_{\lambda L}(T)) + 4 \cdot (R_{\alpha LK}) & \text{für } l > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Weiterhin werden die beiden parallelen Widerstände R_{VS} und $R_{\alpha KW}$ zu einem Ersatzwiderstand R_S zusammengefasst.

$$R_S = R_{VS} || R_{\alpha KW} \quad (4.4)$$

Die Kapazitäten werden nicht zusammengefasst, da sie sich alle auf den Temperaturverlauf der Wärmequelle auswirken.

Es entsteht folgendes thermisches Ersatzschaltbild:

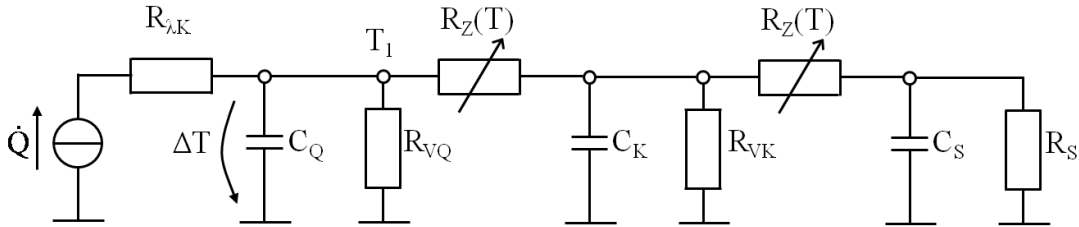


Abbildung 4.4: Zusammengefasstes Ersatzschaltbild der Wärmebrücke

4.3.3 Berechnung des Temperaturverlaufs

Um den Temperaturverlauf über der Kapazität C_Q in Abhängigkeit der zugeführten Heizleistung \dot{Q} zu beschreiben, wird die Übertragungsfunktion im Bildbereich $H(s)$ für das Netzwerk (Abbildung 4.4) aufgestellt. (Der Rechenweg zur Aufstellung der Übertragungsfunktion ist im Anhang A ausführlich dargestellt.)

$$H(s) = \frac{\Delta T(s)}{\dot{Q}(s)} = R_{Erstz} \quad (4.5)$$

Für $\frac{\Delta T}{\dot{Q}}$ wird der Ersatzwiderstand von C_Q und aller parallel dazu liegenden Elemente eingesetzt. Nach dem Zusammenfassen entspricht die Übertragungsfunktion folgender Form:

$$H(s) = \frac{As^2 + Bs + C}{Ds^3 + Es^2 + Fs + G} \quad (4.6)$$

Diese wird nun durch Partialbruchzerlegung in einen äquivalenten Term umgeformt, um sie für die Transformation in den Zeitbereich vorzubereiten.

$$H(s) = \frac{As^2 + Bs + C}{Ds^3 + Es^2 + Fs + G} = \frac{H}{s - s_1} + \frac{I}{s - s_2} + \frac{J}{s - s_3} \quad (4.7)$$

Um den Temperaturverlauf bei Einschalten der Wärmequelle mit der Heizleistung P zu erhalten, wird als Eingangssignal die Sprungfunktion $\frac{P}{s}$ angesetzt.

$$\dot{Q}(s) = \frac{P}{s} \quad (4.8)$$

Damit ergibt sich folgender Ausdruck für den Temperaturverlauf im Bildbereich:

$$\Delta T(s) = H(s) \cdot \dot{Q}(s) = \left(\frac{H}{s - s_1} + \frac{I}{s - s_2} + \frac{J}{s - s_3} \right) \cdot \frac{P}{s} \quad (4.9)$$

$$= \frac{P \cdot H}{s(s - s_1)} + \frac{P \cdot I}{s(s - s_2)} + \frac{P \cdot J}{s(s - s_3)} \quad (4.10)$$

Dieser Term wird nun in den Zeitbereich rücktransformiert.

$$\Delta T(t) = \frac{P \cdot H}{s_1} (e^{s_1 t} - 1) + \frac{P \cdot I}{s_2} (e^{s_2 t} - 1) + \frac{P \cdot J}{s_3} (e^{s_3 t} - 1) \quad (4.11)$$

Mit dieser Vorschrift lässt sich der zeitliche Temperaturverlauf für gegebene Widerstände und Kapazitäten ermitteln. Die Koeffizienten H , I und J sowie die Nullstellen s_1 - s_3 müssen für jeden Widerstand $R_Z(T)$ neu ermittelt werden, was eine direkte Beschreibung der Temperatur in Abhängigkeit von R_Z nicht möglich macht. Um trotzdem eine Vorhersage der Temperaturentwicklung zu ermöglichen, werden im Anschluss die Temperaturen bestimmt, bei denen der Luftspalt maximal bzw. minimal ist. Somit kann mit dem Modell ein Bereich angegeben werden, in dem sich die Temperatur der Quelle bei gegebener Heizleistung einregelt.

4.4 Luftspalt in Abhängigkeit der Quellentemperatur

4.4.1 Begründung der Vorgehensweise

Im zweiten Teil der Modellierung wird der Stellweg des Aktors in Abhängigkeit der Temperatur am Fußpunkt untersucht. Dieser ist schwer zu beschreiben, da er von vielen Faktoren beeinflusst wird. So wirkt sich z. B. die mechanische Spannung auf das Umwandlungsverhalten des Materials aus (siehe Abbildung 1.3). Weiterhin ist die Temperatur über die gesamte Länge des Aktors nicht konstant. Aufgrund der Wärmeverluste durch Konvektion ist das Ende des FGL-Federbleches immer kälter als der Fußpunkt, welcher direkt mit der Wärmequelle verbunden ist. Bei Erwärmung des Aktors über die Austenit-Start-Temperatur A_S wird dadurch immer nur ein gewisser Abschnitt des FG-Materials umgewandelt. Dies macht eine analytische Beschreibung des Stellweges in Abhängigkeit der Temperatur sehr aufwendig und ungenau. Aufgrund dessen wird das thermische Verhalten in diesem Fall empirisch untersucht.

4.4.2 Experimentelle Bestimmung der Größe des Luftspaltes

Im Experiment wird die Quelle auf definierte Temperaturen erwärmt und die Position des Keils mithilfe einer mechanischen Messuhr abgelesen. Die Temperatur wird beginnend bei 30°C in gleichmäßigen Schritten erhöht bis der Luftspalt geschlossen ist. Anschließend wird sie wieder bis auf Zimmertemperatur abgesenkt. Folgende Abhängigkeit wurde ermittelt:

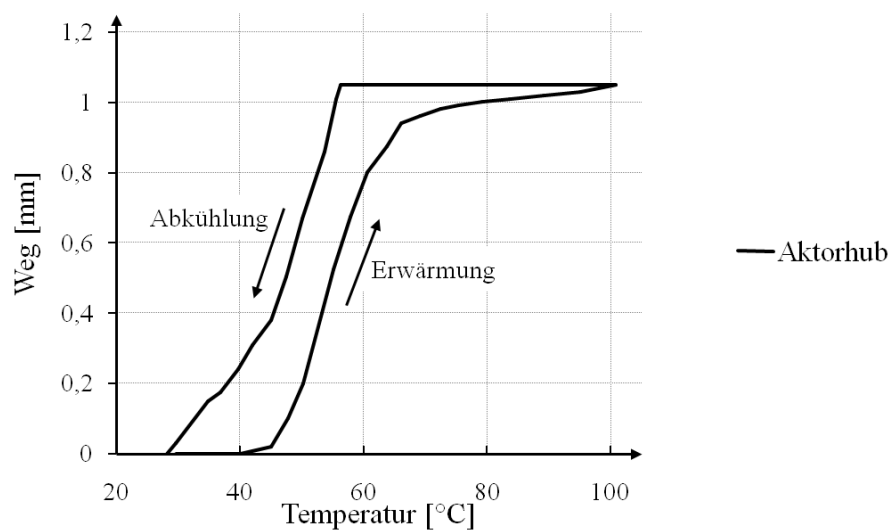


Abbildung 4.5: Hub in Abhängigkeit der Temperatur

Wie zu erwarten gibt es eine deutliche Hysterese zwischen Erwärmung und Abkühlung. Diese ist bedingt durch die in Abschnitt 1.2 beschriebenen unterschiedlichen Phasenumwandlungstemperaturen. Für die praktische Anwendung ist diese jedoch von Vorteil, da somit ein Schwingen des Systems bei Erreichen der Phasenumwandlungstemperatur verhindert wird. Die Austenitumwandlung beginnt bei einer Temperatur von ca 45°C am Fußpunkt des Aktors. Aufgrund der Temperaturdifferenz innerhalb des FG-Blechtes erfolgt ein Stellvorgang bis zu einer Temperatur von ca 100°C. Ab einer Temperatur von 65°C nimmt der Anstieg der aufgenommenen Kurve ab, da der Keil die Aufnahme in der Kupferbrücke erreicht hat. Der weitere Hub wird durch die Nachgiebigkeit der Wärmeleitpaste ermöglicht. Beim Abkühlvorgang beginnt die Stellbewegung bei einer Temperatur von 55°C und endet bei ca. 30°C. Die Sensorik zeigt, dass die Temperatur am Fuß des Aktors mit der an der Wärmequelle gleichgesetzt werden kann.

Mithilfe der Position x und des Winkels $\alpha = 23^\circ$ vom Kupferkeil kann nun die Breite des Luftspaltes l ermittelt werden.

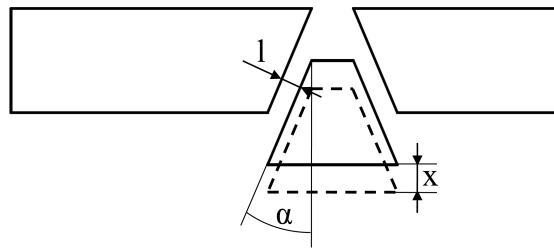


Abbildung 4.6: Geometrie Kupferkeil

Aufgrund der in Abbildung 4.6 dargestellten Geometrie des Keils ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift für die Breite des Spaltes.

$$l = \sin(\alpha) \cdot x(T) \quad (4.12)$$

Daraus ergibt sich ein Maximum von 0,41 mm für die Breite des Luftspaltes bei einem Stellweg von 1,05 mm. Mithilfe der ermittelten Werte können folgende Temperaturgrenzen festgelegt werden, für die der Luftspalt l maximal bzw. minimal ist.

- Erwärmung:

$$l(T) = \begin{cases} 0,41 \text{ mm} & \text{für } T < 45 \text{ °C} \\ 0,00 \text{ mm} & \text{für } T > 67 \text{ °C} \end{cases} \quad (4.13)$$

- Abkühlung:

$$l(T) = \begin{cases} 0,41 \text{ mm} & \text{für } T < 32 \text{ °C} \\ 0,00 \text{ mm} & \text{für } T > 59 \text{ °C} \end{cases} \quad (4.14)$$

4.5 Ermittlung der Widerstände

Im letzten Teil der Modellierung wird erläutert, wie die einzelnen Widerstände der in Abschnitt 4.3 entworfenen thermischen Ersatzschaltung ermittelt werden können. Dabei wird auf die Widerstände eingegangen, deren Modell mit den im Praktikum durchgeführten Messungen nicht bestätigt werden konnte. Dies bedeutet, dass der Widerstand des Luftspaltes sowie der an der Wärmesenke erneut betrachtet werden. Die anderen Widerstandswerte können nach den im Praktikumsbericht des Autors im Abschnitt 3.4 Berechnung der Wärmewiderstände aufgeführten Rechenwegen ermittelt werden [Czo11].

4.5.1 Widerstand am Luftspalt

a) maximaler Widerstand

Die Messungen zur Erfassung des thermischen Widerstandes am Luftspalt waren im Rahmen der Praktikumsarbeit mit einer sehr großen Standardabweichung behaftet. Dadurch konnte mit diesen Werten das entworfene thermische Modell nicht bestätigt werden. Aufgrund dessen werden erneut Versuche durchgeführt, um den thermischen Widerstand am Luftspalt zu erfassen. Nach dem neuen Ansatz wird der Widerstand aus dem Temperaturverlauf im Kupferkeil bei der Erwärmung ermittelt. Dazu wird der Kupferkeil einer Kapazität C_K gleichgesetzt, welche über einen Widerstand R_Z , in diesem Fall der des Luftspaltes, aufgeladen wird (Abbildung 4.7).

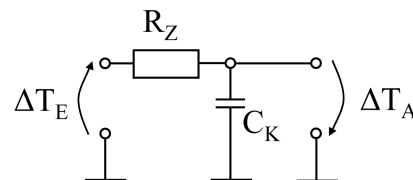


Abbildung 4.7: Ersatzschaltung für Luftspalt und Kupferkeil

Um eine Temperaturdifferenz zum Erwärmen der Kapazität zu erzeugen, wird die Wärmequelle auf eine definierte Temperatur gebracht. Nun wird der Kupferkeil in die Wärmebrücke eingesetzt und die Aufwärmkurve aufgenommen. Dabei wird darauf geachtet, dass ein bestimmter Luftspalt zwischen Keil und Quelle vorhanden ist. Anhand der Aufwärmkurve (Abbildung 4.8) kann nun die Zeitkonstante und daraus der Widerstand des Luftspaltes grafisch ermittelt werden.

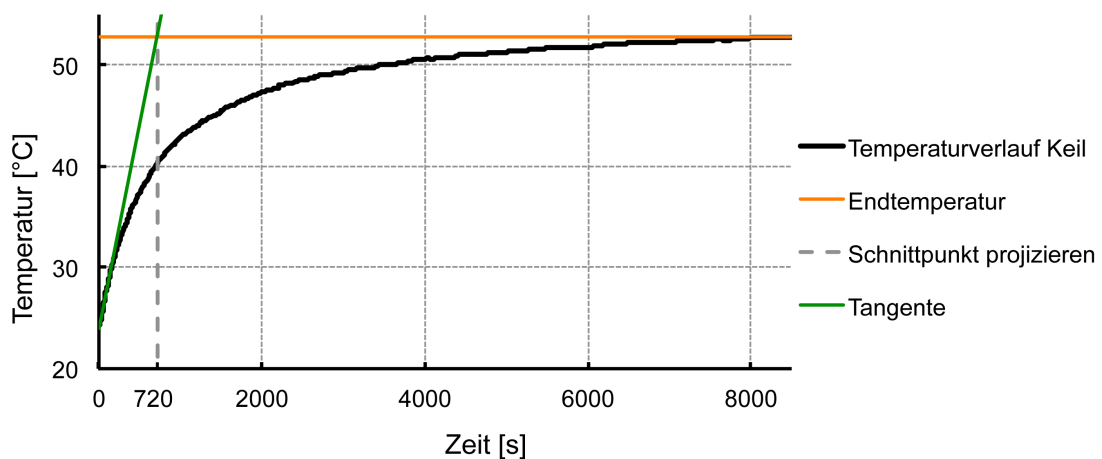


Abbildung 4.8: Temperaturverlauf Kupferkeil

Der Temperaturverlauf entspricht annähernd der Sprungantwort eines PT1-Gliedes. Die Zeitkonstante kann somit über den Schnittpunkt zwischen der Tangente am Beginn der Aufwärmkurve und der Endtemperatur ermittelt werden. Aus der Zeitkonstante τ kann über den Zusammenhang 4.15 der Widerstand bestimmt werden. Die Kapazität des Kupferkeils lässt sich aus der Masse m und der spezifischen Wärmekapazität c_p von Kupfer [KK09] berechnen.

$$R = \frac{\tau}{C} = \frac{720 \text{ s}}{21,24 \text{ Ws/K}} \quad (4.15)$$

$$= 33,90 \text{ K/W}$$

$$C = m \cdot c_p = 55,17 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 385 \text{ Ws/kgK} \quad (4.16)$$

$$= 21,24 \text{ Ws/K}$$

Die Endtemperatur des Kupferkeils ist geringer als die Temperatur der Wärmequelle. Dies ist dadurch zu begründen, dass ein Verlustwärmestrom einsetzt, sobald eine Temperaturdifferenz zur Umgebung vorhanden ist. Diese Verluste verfälschen den Verlauf der Kurve mit zunehmender Temperatur. Für die Auswertung ist dies jedoch nicht von Bedeutung, da die Tangente an den Beginn der Kurve angelegt wird. Zu diesem Zeitpunkt ist der Temperaturunterschied zur Umgebung so gering, dass der Verlustwärmestrom vernachlässigt werden kann. Der Verlauf entspricht dem einer Erwärmung ohne Verluste. Weiterhin wird die thermische Kapazität nicht nur über den Widerstand des Luftspaltes erwärmt. In Reihe zu dem Widerstand des Spaltes liegen die Leitwiderstände durch das Kupfer. Diese sind im Verhältnis zum Widerstand durch den Spalt jedoch so gering (<1%), dass sie vernachlässigt werden können.

Die Messungen haben gezeigt, dass der tatsächliche Widerstand viel geringer ist, als der modellierte. Ursache dafür ist die Wärmeleitung über die Bodenplatte aus Teflon, welche bei der Modellierung nicht beachtet wurde. Wird diese in die Berechnung einbezogen, ergibt sich ein Widerstand, welcher den Dimensionen des im Experiment ermittelten Wertes entspricht. Dabei ist es schwer einen exakten Wert zu berechnen, da die Länge der Wärmeleitung durch das Teflon nicht genau bestimmt werden kann. Aufgrund der Geometrie der Kupferteile kann die Wärme auf einer großen Fläche von der Quelle in das Teflon sowie auch vom Teflon in den Keil eindringen. Für die Modellierung wird ein Wert von 34 K/W für den Widerstand bei maximalem Luftspalt verwendet (siehe Formel 4.15).

b) minimaler Widerstand

Der Widerstand ist dann minimal, wenn der Luftspalt geschlossen ist. In diesem Fall ist nur noch der Widerstand R_{KS} vorhanden, der durch Unebenheiten der Kupferflächen zueinander entsteht. Da dieser Widerstand durch die Fertigung der Kupferteile bestimmt wird, ist

er schwer analytisch zu beschreiben. Deshalb wird dieser anhand der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Keil bei bekanntem Wärmestrom und geschlossenem Luftspalt ermittelt. Der Widerstand kann somit aus den im Praktikum aufgenommenen Messwerten ermittelt werden. Er ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetz:

$$R_{KS} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{14,0 \text{ K}}{37,5 \text{ W}} \quad (4.17)$$

$$= 0,37 \text{ K/W}$$

4.5.2 Widerstand der Wärmesenke

Wie im Ausblick der vorangegangenen Praktikumsarbeit erwähnt wurde, fand im Anschluss an die Praktikumsarbeit eine Überarbeitung der durchgeführten Versuche statt. Die Thermoelemente zur Aufnahme der Temperaturdifferenz in der Wasserkühlung werden gegen PT100 Temperatursensoren der Genauigkeitsklasse $\frac{1}{3}$ A ausgetauscht. Der abgeführte Wärmestrom kann somit genauer bestimmt werden und die gesamte Messabweichung wird geringer. Erneute Versuche haben gezeigt, dass der modellierte Wert nicht im Bereich der Messabweichung des experimentell aufgenommenen Wertes liegt. Dies ist durch die starke Vereinfachung des realen Sachverhaltes in dem Modell zu erklären. Im Modell wurde davon ausgegangen, dass der Wärmestrom nur vom Kupfer an das Wasser abgegeben wird. In der Realität wird die Wärme auch über die eingepressten Aluminiumhülsen, welche zur Befestigung des Wasserschlauchs dienen, an das Wasser abgeleitet. Dies führt dazu, dass der aufgenommene Übergangswiderstand geringer ist als der berechnete. Das neue Modell (Abbildung 4.9) setzt in diesem Fall drei Widerstände parallel zueinander an, welche die Wärme in das Wasser übertragen.

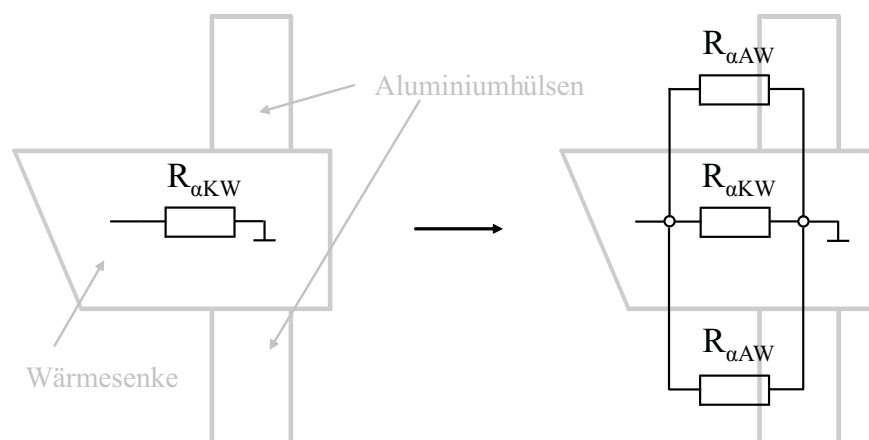


Abbildung 4.9: neues Modell Wärmesenke

Der mittlere Widerstand beschreibt den Übergang vom Kupfer in das Wasser, wie er auch im Praktikum angesetzt wurde [Czo11]. Die beiden zusätzlichen Widerstände stehen für den Wärmeübergang in den Aluminiumhülsen. Bei einer Länge von 12 mm des Wärmeübergangs vom Kupfer ins Wasser und einer Länge von 21 mm je einer Aluminiumhülse ergibt sich ein gesamter Wärmeübergangswiderstand von 1,16 K/W. Die Berechnung der Widerstände erfolgt nach dem Modell aus der Praktikumsarbeit [Czo11]. Im Experiment wurde ein Wert von 1,17 K/W mit einer maximalen Messabweichung von 0,08 K/W aufgenommen.

4.6 Zusammenführung des Modells

Mithilfe der Widerstände und der Sprungantwort des Systems im Zeitbereich $T(t)$, kann der Temperaturverlauf bei Einschalten der Wärmequelle mit beliebiger Leistung beschrieben werden. Aufgrund der Kenntnis von Maximum und Minimum des Widerstandes am Luftspalt können nun die Formeln für den Temperaturverlauf bei maximalem und minimalem Widerstand ermittelt werden. Sie ergeben sich nach Formel (4.11). Die Herleitung der Formeln befindet sich im Anhang A bzw. im Abschnitt 4.3.3.

$$T(R_{min}, P) = P \cdot (-1,5979 \cdot (e^{-0,0060 \cdot t} - 1) - 0,0030 \cdot (e^{-0,3094 \cdot t} - 1) - 0,0790 \cdot (e^{-0,0625 \cdot t} - 1)) \quad (4.18)$$

$$T(R_{max}, P) = P \cdot (-12,1822 \cdot (e^{-0,0012 \cdot t} - 1) - 0,0007 \cdot (e^{-0,0194 \cdot t} - 1) - 0,1292 \cdot (e^{-0,0044 \cdot t} - 1)) \quad (4.19)$$

Diese Funktionen gelten nur für den Fall des maximalen bzw. minimalen Widerstandes am Luftspalt. Deshalb müssen die Heizleistungen ermittelt werden, für die diese Zustände vorliegen. Da die Temperaturgrenzen für die der Luftspalt maximal/minimal ist bekannt sind, kann die Heizleistung ermittelt werden, ab welcher der Luftspalt geöffnet bzw. geschlossen ist. Dazu wird die Formel 4.18 angesetzt und die Heizleistung P bestimmt welche nötig ist um die Wärmequelle von 23 °C auf 67 °C zu erwärmen (siehe 4.13). Somit wird die Leistungsgrenze ermittelt, ab welcher der Widerstand am Luftspalt in jedem Fall minimal ist.

$$P = \frac{\Delta T}{(-1,5979 \cdot (e^{-0,0060 \cdot t} - 1) - 0,0030 \cdot (e^{-0,3094 \cdot t} - 1) - 0,0790 \cdot (e^{-0,0625 \cdot t} - 1))} \quad (4.20)$$

Für t wird ein Wert größer 5τ eingesetzt. Damit ist sichergestellt, dass das System im eingeschwungenen Zustand vorliegt. Die Zeitkonstante τ kann aus dem Exponenten der e-Funktion bestimmt werden. Für eine Zeit von $t = 2000$ s und einem ΔT von 44 K ergibt sich eine Heizleistung von 26,2 W.

Ebenso kann die untere Leistungsgrenze ermittelt werden, unter welcher der Widerstand des Luftspaltes in jedem Fall maximal ist. Damit lässt sich ein Leistungsbereich eingrenzen, in welchem die Temperatur der Wärmequelle nicht genau bestimmt werden kann. Außerhalb dieses Leistungsbereichs ist der Widerstand am Luftspalt bekannt und ermöglicht eine genaue Bestimmung der Temperatur der Wärmequelle. Somit ergibt sich eine erste Beschreibung für die Temperatur in Abhängigkeit der Heizleistung:

- obere Temperaturgrenze:

$$T_O(P) = \begin{cases} T(R_{max}, P) & \text{für } P < 1,8 \text{ W} \\ 45^\circ\text{C} < T < 67^\circ\text{C} & \text{für } 1,8 \text{ W} < P < 26,2 \text{ W} \\ T(R_{min}, P) & \text{für } 26,2 \text{ W} < P \end{cases} \quad (4.21)$$

- untere Temperaturgrenze:

$$T_U(P) = \begin{cases} T(R_{max}, P) & \text{für } P_{max} < 1,8 \text{ W oder } P_{min} < 0,7 \text{ W} \\ 32^\circ\text{C} < T < 59^\circ\text{C} & \text{für } P_{max} > 1,8 \text{ W und } P_{min} < 21,4 \text{ W} \\ T(R_{min}, P) & \text{für } P_{max} > 26,2 \text{ W und } P_{min} > 21,4 \text{ W} \end{cases} \quad (4.22)$$

Es gilt $P_{min} < P_{max}$.

4.7 Untersuchung der Schwingungsfähigkeit

Um eine vernünftige Regelung des Wärmewiderstandes sowie eine lange Lebensdauer des Aktors zu realisieren, muss ein Schwingen des Systems verhindert werden. Damit ein Schwingen einsetzt, müssten gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. So dürfte zwischen den Startpunkten der Phasenumwandlung, ab welchen der Aktor den Luftspalt öffnet bzw. schließt, keine oder nur eine sehr geringe Hysterese auftreten. Da das reelle System jedoch eine Hysterese von ca. 10 K aufweist, ist ein Schwingen nur noch dann möglich, wenn die thermische Zeitkonstante des Aktors viel größer als die der Wärmequelle ist. In diesem Fall würde sich die Wärmequelle weit über die A_S Temperatur erwärmen bevor eine Phasenumwandlung im Aktor beginnt. Schließt der Aktor den Widerstand, kommt es zum Temperaturabfall der Wärmequelle und sie kühlt sich aufgrund der kleineren Zeitkonstante schneller ab als der Aktor. Ist dieser ebenfalls abgekühlt, wird der Widerstand zur Wärmesenke wieder vergrößert. Die Erwärmung setzt wieder ein. Nach diesem Prinzip würde sich die Temperatur langsam auf einen stationären Endwert einschwingen.

Um solch ein Verhalten auszuschließen muss nachgewiesen werden, dass der Aktor eine geringere Zeitkonstante als die Wärmequelle besitzt. Dazu werden beide Zeitkonstanten τ_A (Aktor) und τ_Q (Wärmequelle) miteinander verglichen. Für die thermische Zeitkonstante wird folgende allgemeine Formel angesetzt:

$$\tau = R \cdot C \quad (4.23)$$

Dabei ist R der Übergangswiderstand an die Umgebung, über welchen sich die thermische Kapazität C des Bauteiles entlädt. Der Widerstand ist folgendermaßen definiert:

$$R = \frac{1}{\alpha \cdot A_O} \quad (4.24)$$

Der Wert α steht für den Wärmeübergangskoeffizienten und A_O für die Oberfläche des Bauteils. Die thermische Kapazität kann über die Masse m und die spezifische Wärmekapazität c_p des Materials ermittelt werden.

$$C = m \cdot c_p \quad (4.25)$$

Es wird das Verhältnis beider Zeitkonstanten zueinander ermittelt:

$$\frac{\tau_Q}{\tau_A} = \frac{m_Q \cdot c_{pQ}}{\alpha_Q \cdot A_{OQ}} \cdot \frac{\alpha_A \cdot A_{OA}}{m_A \cdot c_{pA}} \quad (4.26)$$

Da diese Berechnung nur zum überschlägigen Bestimmen des Verhältnisses der Zeitkonstanten zueinander dient, werden für die beiden Wärmeübergangskoeffizienten α_A und α_Q jeweils gleiche Werte angesetzt. Somit können diese gekürzt werden. In der Realität ist der Übergangskoeffizient der Wärmequelle geringer als der des Aktors, da die Wärmequelle thermisch isoliert ist und somit einen größeren Wärmeübergangswiderstand zur Umgebung hat als das Aktorblech. Diese Vereinfachung wird angenommen, da der Wärmeübergangskoeffizient für komplexe Oberflächen nur sehr aufwendig zu ermitteln ist. Bei Verwendung der wirklichen Wärmeübergangskoeffizienten würde der Unterschied zwischen den Zeitkonstanten noch größer werden.

Es ergibt sich folgendes Verhältnis:

$$\frac{\tau_Q}{\tau_A} = \frac{m_Q \cdot c_{pQ} \cdot A_{OA}}{A_{OQ} \cdot m_A \cdot c_{pA}} = \frac{0,168 \text{ kg} \cdot 385 \text{ Ws/kg}\cdot\text{K} \cdot 1950 \text{ mm}^2}{5120 \text{ mm}^2 \cdot 0,0058 \text{ kg} \cdot 470 \text{ Ws/kg}\cdot\text{K}} = 9,0 \quad (4.27)$$

Der Wert für die spezifische Wärmekapazität des FG-Materials wurde aus [Oel04] übernommen. Die Werte für die Oberflächen der Teile ergeben sich aus den geometrischen Abmessungen und die Massen wurden experimentell bestimmt. Es ist zu erkennen, dass die Zeitkonstante der Wärmequelle ca. 9 mal größer als die des Aktorbleches ist. Somit folgt die Temperatur des Aktors der Temperatur der Wärmequelle faktisch ohne zeitlichen Versatz.

5 Konstruktion der Wärmebrücke

5.1 Aufbau der Wärmebrücke

Beim Entwurf der selbstregelnden Wärmebrücke wird auf der vorangegangenen Praktikumsarbeit des Autors aufgebaut. Dazu wird der entworfene Demonstrator für den schaltbaren Wärmewiderstand wiederverwendet. Dieser besteht aus einer Wärmequelle, einer Wärmesenke sowie einem Verbindungsglied in Form eines Keiles. Dieser Keil passt genau in eine Aussparung zwischen Quelle und Senke und schließt somit, wenn eingesetzt, den Wärmekontakt. Wird der Keil aus der Aussparung heraus gezogen, entstehen zwei Luftspalte zwischen den Oberflächen von Keil und Wärmebrücke.

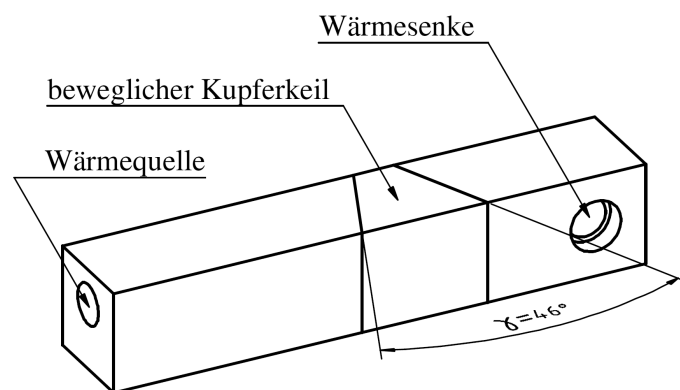


Abbildung 5.1: Wärmebrücke

Wärmequelle, -senke und Verbindungskeil sind aus Kupfer gefertigt. Es besitzt mit $372 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ eine gute Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Luft mit $25,42 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$ bei 20°C [KK09]. Die beiden Luftspalte erhöhen den Widerstand zwischen Wärme und Senke und beeinflussen somit den fließenden Wärmestrom.

Um einen konstanten Wärmeeintrag in das Material zu garantieren, wird als Wärmequelle eine Heizpatrone verwendet, welche durch eine externe Stromversorgung angesteuert wird. Somit kann der eingebrachte Wärmestrom genau eingestellt werden. Die Heizpatrone wird in einer Bohrung komplett versenkt. Dadurch kann garantiert werden, dass der gesamte Wärmestrom an das Kupfer abgegeben wird.

Die Wärmesenke ist durch eine Wasserkühlung realisiert. Dazu wird ein Kühlwasserstrom durch eine Bohrung im Kupfer geleitet. Dieser kann so eingestellt werden, dass die Temperatur auf der Seite der Quelle annähernd konstant bleibt.

Weiterführende Informationen zum Aufbau der Wärmebrücke sind in [Czo11] nachzulesen. Im Anhang B ist eine Explosionsdarstellung des Demonstrators angefügt.

5.2 Konstruktion des Aktors

5.2.1 Aufbau des Aktors

Da das Aktorkonzept zweier gegeneinander vorgespannter Spiralfedern auf Grund der großen Zeitkonstante in diesem Fall nicht eingesetzt werden kann, muss ein neuer Ansatz zur Realisierung einer Stellbewegung gefunden werden. Dabei ist es wichtig, dass die Wärme der Quelle so schnell wie möglich in den Aktor eindringt, ohne dass viele zusätzliche Teile erwärmt werden müssen. Solche haben immer eine Wärmekapazität und bewirken somit eine zusätzliche Verzögerung der Reaktion des Aktors.

Aus diesem Grund wird der Aktor aus zwei Blattfedern aufgebaut. Eine der Federn ist aus thermischer FGL gefertigt und eine aus herkömmlichem Federstahl. Beide werden über ein Distanzstück direkt mit der Wärmequelle verbunden. Das Distanzstück schafft den nötigen Abstand zwischen Kupfer und Aktor, um eine Isolationsschicht um die Wärmebrücke herum anzubringen zu können. Das Distanzstück der FGL-Feder ist aus Kupfer gefertigt, damit die Wärme ohne große zeitliche Verzögerung an den Aktor weitergeleitet wird. Das der Stahlfeder ist aus Isolierenden Teflon gefertigt und verhindert somit unnötige Wärmeverluste. Die FGL-Blattfeder wird mit der flachen Seite an dem Distanzstück angeschraubt. Somit kann die Wärme über eine große Kontaktfläche in die Feder eindringen. Diese besitzt aufgrund ihrer Form und Größe eine sehr geringe Wärmekapazität. Das Vorspannen beider Federn geschieht über die Schrauben am Ende der Federbleche. Diese ermöglichen ein nachträgliches Anpassen der Vorspannung.

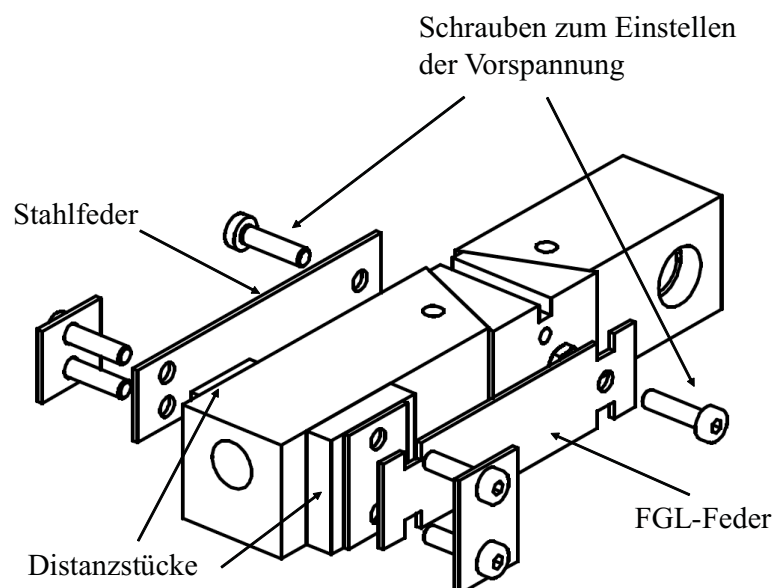


Abbildung 5.2: Aufbau FGL-Aktor

5.2.2 Funktionsweise des Aktors

Der Aktor besteht, wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, aus zwei Federblechen, einer Stell- und einer Rückstellfeder. Die Stellfeder ist aus thermischer Formgedächtnislegierung gefertigt und ändert bei Überschreiten einer definierten Temperaturgrenze A_S ihr E-Modul und damit die Federsteifigkeit. Beide Federn werden mit einer definierten Kraft gegeneinander vorgespannt. Die Grafik 5.3 zeigt die Federkennlinien der Stahlfeder sowie der FGL-Feder in beiden Zuständen.

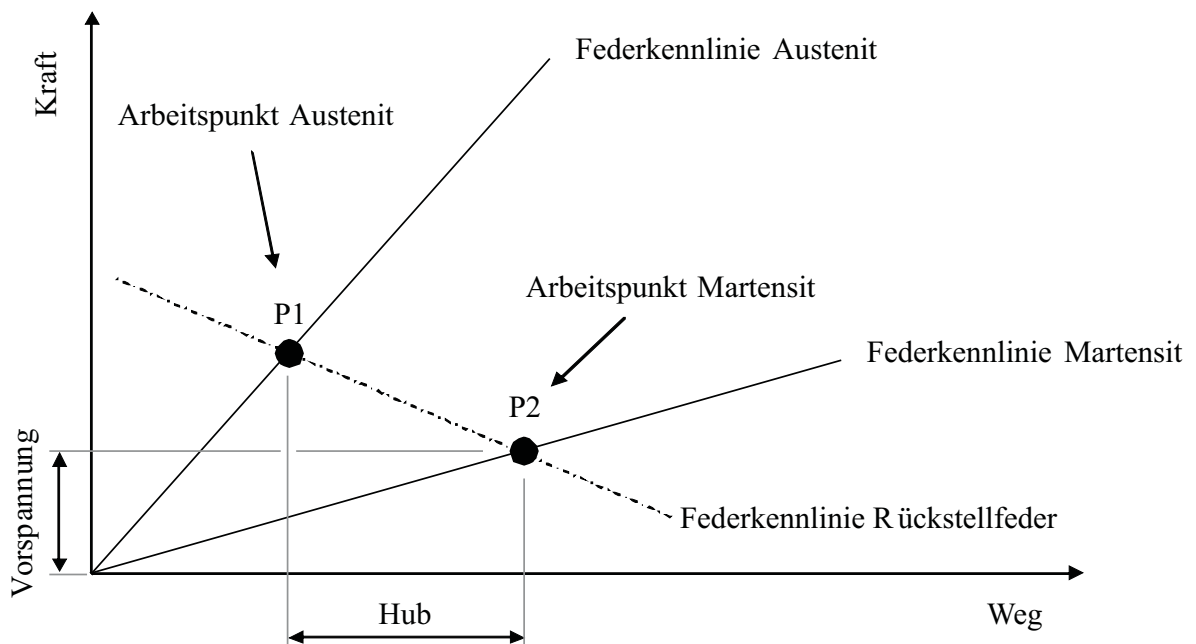


Abbildung 5.3: Kennlinien Federaktor Quelle

Erwärmt sich das FG-Material, so erhöht die Stellfeder ihre Steifigkeit. Der Arbeitspunkt wechselt auf die Federkennlinie des Austenits und der Aktor beginnt den Keil in die Kupferbrücke zu schieben. Der Hub endet bei Erreichen des Arbeitspunktes P1, wenn beide Federkräfte wieder im Gleichgewicht sind. Dieser Arbeitspunkt wird bei einer Temperatur größer A_f erreicht und bei einer Temperatur über M_s gehalten. Kühlt die FGL unter diese Temperatur ab, wechselt der Arbeitspunkt zurück auf die Kennlinie der Feder im martensitischen Zustand. Die Federsteifigkeit sinkt und der Aktor biegt sich zurück. Ist der Arbeitspunkt P2 bei einer Temperatur kleiner M_f erreicht, stehen beide Federkräfte wieder im Gleichgewicht. Der Aktor hält die Position. Ein solcher Aktorzyklus ist in der Abbildung 5.4 dargestellt.

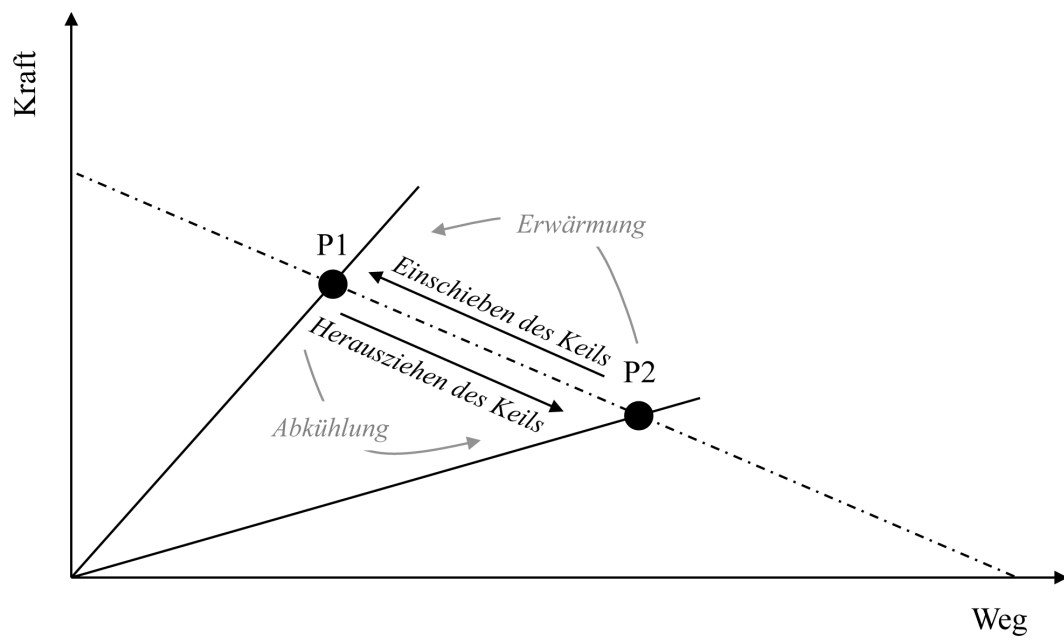


Abbildung 5.4: Arbeitszyklus Aktor

Um diesen Aktorzyklus modellieren zu können, werden im nächsten Abschnitt die Kennlinien der beiden Federbleche ermittelt.

5.2.3 Ermittlung der Federkennlinien und Belastungsgrenzen

Zur Bestimmung der Kraft einer Blattfeder bei definierter Durchbiegung wird das Modell eines einseitig eingespannten Balkens angesetzt.

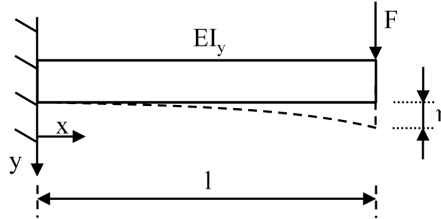


Abbildung 5.5: Modell Federblatt

Für diesen Balken kann nun mithilfe der Differentialgleichung für die Biegelinie (5.1) und den gegebenen Randbedingungen die Durchbiegung η in Abhängigkeit der wirkenden Kraft F ermittelt werden [Tot10].

$$EI_y \eta = \frac{F}{6} x^3 + C_1 \frac{x^2}{2} + C_2 x + C_3 \quad (5.1)$$

Randbedingungen:

$$M_{(x=l)} = 0 \longrightarrow C_1 = -Fl$$

$$\eta'_{(x=0)} = 0 \longrightarrow C_2 = 0$$

$$\eta_{(x=0)} = 0 \longrightarrow C_3 = 0$$

Werden die Koeffizienten $C_1 - C_3$ eingesetzt und die Gleichung nach $\frac{F}{\eta}$ umgestellt, ergibt sich für $x = l$ folgender Term:

$$D = \frac{F}{\eta} = \frac{3 \cdot E \cdot I_y}{l^3} \quad (5.2)$$

Der somit berechnete Wert D besitzt die Einheit N/mm und wird in den nachfolgenden Betrachtungen wie eine Federkonstante behandelt. Für das Elastizitätsmodul E der FGL-Feder wird im austenitischen Zustand 75000 N/mm^2 und im martensitischen Zustand 15500 N/mm^2 angenommen. Diese Werte wurden bei Untersuchungen im Rahmen der Praktikumsarbeit aufgenommen. Die Stahlfeder besitzt ein E-Modul von 210000 N/mm^2 [MWJV07b]. Das Flächenträgheitsmoment I_y berechnet sich nach [Sch07] folgendermaßen:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (5.3)$$

Dabei ist b die Breite und h die Dicke des Federblattes.

Bei der Auslegung muss darauf geachtet werden, dass die Stahlfeder im Betrieb nicht über die Streckgrenze belastet wird und sich dadurch plastisch verformt. Dazu wird nach [MWJV07a] die Oberflächenspannung σ in Abhängigkeit der wirkenden Kraft F ermittelt.

$$\sigma_b = \frac{6 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (5.4)$$

Daraus kann bei Kenntnis der zulässigen Biegespannung $\sigma_{b\,zul}$ die maximale Kraft bestimmt werden, mit welcher das Federblatt belastet werden darf.

$$F_{max} = \frac{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{b\,zul}}{6 \cdot l} \quad (5.5)$$

Bei der FGL-Feder muss die Belastungsgrenze nicht beachtet werden, da sich das Material vor Erreichen der Streckgrenze pseudoplastisch oder pseudoelastisch, je nach Zustand, verformt.

Mit diesen Zusammenhängen kann der Federaktor berechnet werden. Die eingesetzten Größen sowie die Ergebnisse der Auslegung sind in Tabelle 5.1 dargestellt

Tabelle 5.1: Parameter und Ergebnisse der Auslegung des Aktors

Parameter	Wert	Einheit	Bedeutung
E_A	75000	N/mm ²	E-Modul FGL im Austenitzustand
E_M	15500	N/mm ²	E-Modul FGL im Martensitzustand
E_{Stahl}	210000	N/mm ²	E-Modul Stahl
l	37,0	mm	federnde Länge der Blattfedern
b_{FGL}	15,0	mm	Breite der FGL-Blattfeder
b_{Stahl}	12,7	mm	Breite der Stahl-Blattfeder
h_{FGL}	1,0	mm	Höhe der FGL-Blattfeder
h_{Stahl}	0,6	mm	Höhe der Stahl-Blattfeder
$\sigma_{b\,zul\,Stahl}$	500	N/mm ²	zulässige Biegespannung Stahl[HMC][Hof]
Ergebnisgrößen	Wert	Einheit	Bedeutung
D_A	5,6	N/mm	Federkonstante FGL-Feder im Austenitzustand
D_M	1,1	N/mm	Federkonstante FGL-Feder im Martensitzustand
D_{Stahl}	2,8	N/mm	Federkonstante Stahl-Feder
$F_{Stahl\,max}$	17,2	N	Belastungsgrenze Stahlfeder

Die Abmaße der Federblätter wurden experimentell ermittelt.

5.3 Modellierung des Aktors

5.3.1 Erläuterung

Aus den ermittelten Kennlinien kann nun das Verhalten des Aktors bei kompletter Phasenumwandlung abgeleitet werden. Ausgangspunkt der Modellierung sind die Kennwerte, welche durch den Aufbau des Aktors beeinflussbar sind. Das sind die Hubweite sowie auch der Kraftverlauf des Aktors über den gefahrenen Weg. Die Länge des Hubes wird bestimmt durch die Federsteifigkeit der Rückstellfeder sowie der Größe der Vorspannung. Verringert sich die Federkonstante der Rückstellfeder, wird auch der Anstieg der Kennlinie dieser Feder flacher. Der Abstand zwischen den beiden Arbeitspunkten $P1$ und $P2$ wächst. Vergrößert man die Vorspannung beider Federn zueinander, so nimmt der Aktorhub ebenfalls zu (Abbildung 5.6).

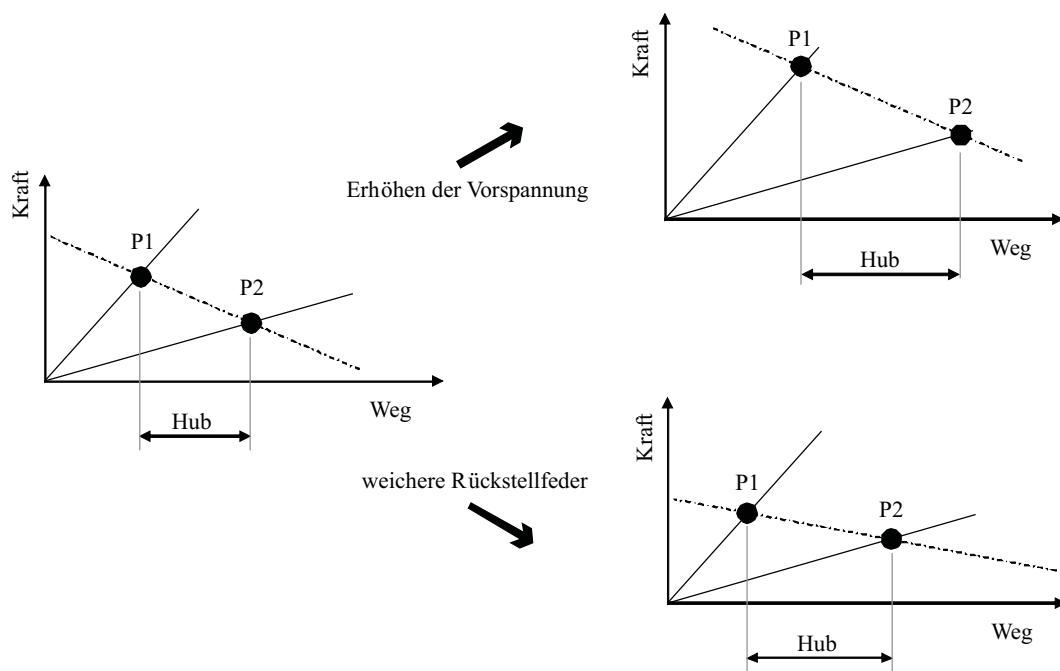


Abbildung 5.6: Abhängigkeit des Hubes von Vorspannkraft und Rückstellfeder

Die Druckkraft des Aktors nimmt mit dem gefahrenen Hub linear ab. Der Kraftverlauf ändert sich beim Wechseln der Rückstellfeder. Eine weichere Rückstellfeder bewirkt ein langsameres Abnehmen der Aktorkraft. Insgesamt jedoch ist die vorhandene Kraft bei Beginn des Hubes geringer, als die bei einer steiferen Rückstellfeder mit gleichem Hub. Will man eine große Druckkraft erreichen, muss eine steife Rückstellfeder verwendet werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese nicht beliebig stark vorgespannt werden kann. Wenn dagegen ein großer Hub verwirklicht werden soll, muss eine schwache Rückstellfeder zur Anwendung kommen.

5.3.2 Modellierung

Die eingeführten Variablen sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

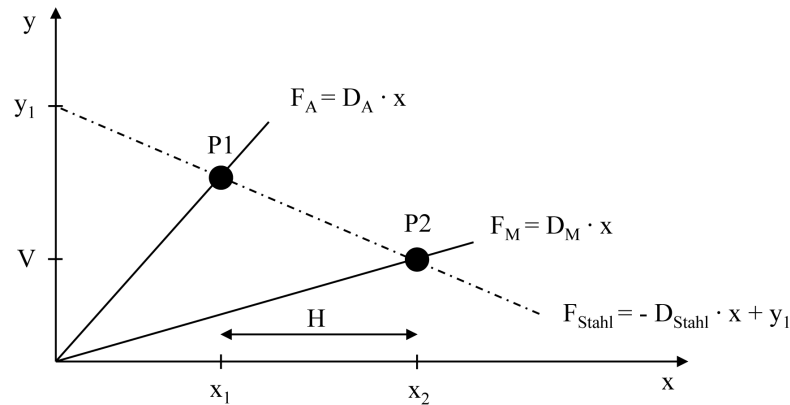


Abbildung 5.7: Variablen zur Modellierung des Aktors

Variable	Bedeutung
H	Hub
D_A	Federkonstante Austenitzustand
D_M	Federkonstante Martensitzustand
D_{Stahl}	Federkonstante Rückstellfeder
V	Vorspannkraft
x_1	Position aktivierter Zustand
x_2	Position deaktivierter Zustand

Bei gegebenen Steifigkeiten der FGL-Feder und der Zugfeder kann die Hubweite H wie folgt bestimmt werden (Herleitung siehe Anhang C.1):

$$H = V \cdot \left(\frac{1}{D_M} - \frac{1}{D_A + D_{Stahl}} - \frac{D_{Stahl}}{D_M \cdot (D_A + D_{Stahl})} \right) \quad (5.6)$$

Diese Formel beschreibt den Hub, welchen der Aktor ohne Belastung ausführen würde. Für eine realistische Modellierung müssen jedoch weitere Faktoren beachtet werden. In den meisten Fällen muss eine definierte Kraft nach dem Ausführen des Hubes vorhanden sein. Zusätzlich müssen die durch die Führung entstehenden Reibkräfte überwunden werden.

Um eine Restkraft nach dem Ausführen des gewünschten Hubes zu erhalten, darf der Aktor nicht den gesamten möglichen Hub ausführen, sondern muss vorher gegen einen vorgegebenen Anschlag fahren. Je kürzer die gefahrene Hubbewegung, desto größer die restliche Druckkraft.

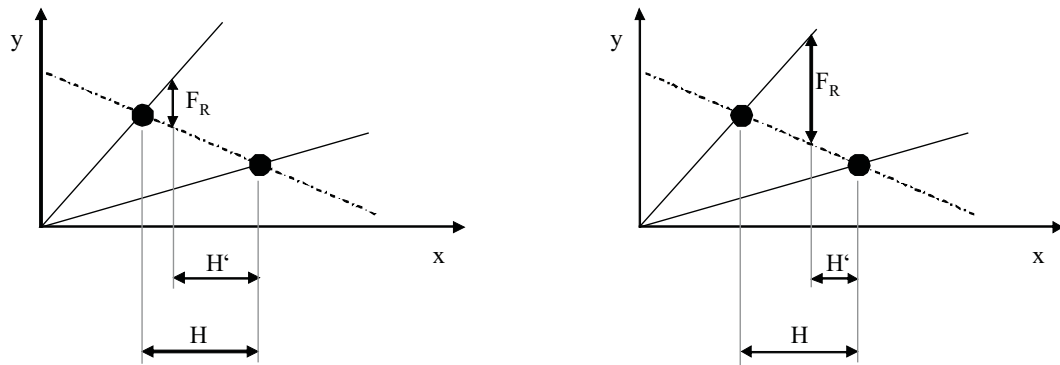


Abbildung 5.8: Restkraft in Abhängigkeit des Hubes

Um den Hub H' in Abhängigkeit einer definierten Restdruckkraft F_R zu ermitteln wird folgendes angesetzt (Herleitung siehe Anhang C.2):

$$H' = H - \frac{F_R}{D_A + D_{Stahl}} \quad (5.7)$$

Dabei darf die Restkraft bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Sie ist maximal bei einem Resthub $H' = 0$ mm.

$$F_{Rmax} = V \cdot \left(\frac{D_A}{D_M} - 1 \right) \quad (5.8)$$

Führt der Aktor den gesamten Hub H aus, ist die Restkraft $F_R = 0$ N.

Zur Bestimmung der Restanpresskraft nach Ausführung eines definierten Hubes kann nach C.2 folgende Formel angesetzt werden:

$$F_R = (H - H') \cdot (D_A + D_{Stahl}) \quad (5.9)$$

Der eingesetzte Hub H' darf maximal H und minimal Null sein

6 Experimentelle Erprobung und Bewertung

Im vorliegenden Abschnitt wird die Funktion, sowie das thermodynamische Modell des entwickelten Demonstrators überprüft. Dazu wird ein Versuchsaufbau entworfen, welcher eine realistische Einsatzsituation an einer Maschine mit thermischer Verlustleistung nachstellt.

6.1 Versuchsaufbau und Bedingungen

Um den Temperaturverlauf der Wärmequelle nachvollziehen zu können, wird nahe der Heizpatrone ein Thermoelement Typ K in das Kupfermaterial eingebracht. Mit diesem kann der Temperaturverlauf bei variierender Heizleistung mit einer Genauigkeit von $\pm 2,0 \text{ K}$ [PCE11] aufgenommen werden. In diesem Fall ist die Messgenauigkeit der Sensorik ausreichend, da sich die Temperatur in einem großen Intervall bewegt und daher die Messtoleranz im Verhältnis zu den absoluten Messwerten hinreichend gering ist. Die Heizpatrone ist an ein Labornetzteil angeschlossen, welches ein in Matlab Simulink erzeugtes Signal zur Ansteuerung der Patrone verstärkt. Somit können beliebige Verläufe des eingebrachten Wärmestroms an der Wärmequelle realisiert werden. Auf der Seite der Senke wird mit einem konstanten Kühlwasserstrom die Wärme aus dem Kupfer abgeführt. Folgende Abbildung stellt den Versuchsaufbau schematisch dar:

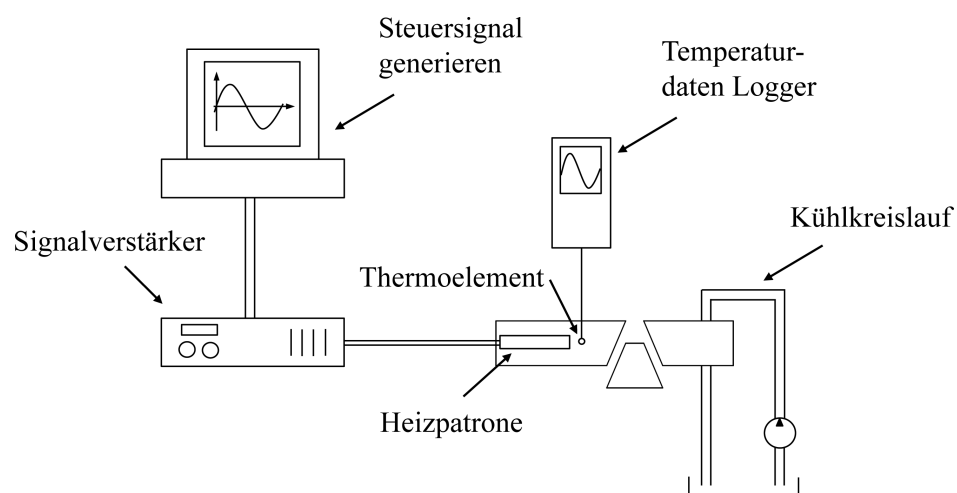


Abbildung 6.1: Schema Versuchsaufbau

Die Versuche werden in einem klimatisierten Raum durchgeführt. Der Aufbau wird durch eine Schicht aus expandiertem Polypropylen (EPP) thermisch isoliert. Dadurch werden die

gleichen Bedingungen geschaffen, wie sie während der Untersuchung der einzelnen Widerstände vorlagen. Der Aktor wurde nach den Beschreibungen in Abschnitt 5.2 aufgebaut und mit einer Kraft von 3 N vorgespannt. Es wird ein Hubweg von 1 mm realisiert mit einer theoretischen Restkraft von 1 N. Die Modellierung des Aktors wurde im Rahmen der Versuche nicht untersucht.

6.2 Versuchsauswertung

6.2.1 Sinusförmiger Heizverlauf

Die Heizpatrone wird im Rahmen der experimentellen Untersuchung mit zwei unterschiedlichen Eingangssignalen angesteuert. Im ersten Versuch ist dies ein sinusförmiger Leistungsverlauf mit dem Maximum bei 30 W und einem Minimum bei 5 W (Abbildung 6.2). Dieser dient der Nachbildung eines realen Einsatzes.

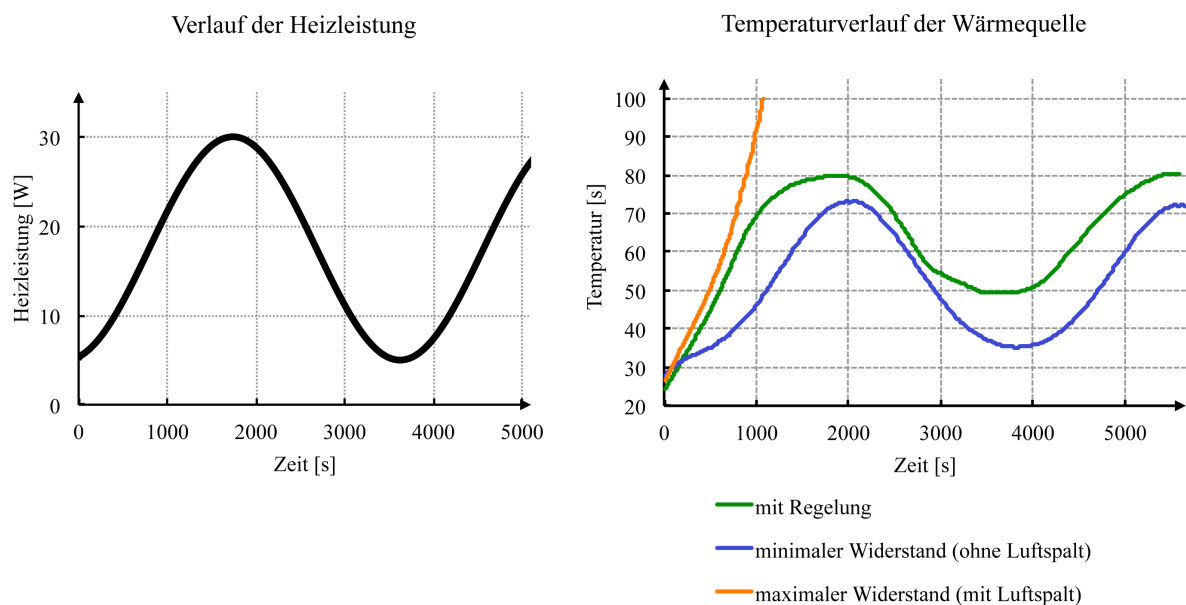


Abbildung 6.2: Signalverlauf erster Versuch

Die Messung für den Temperaturverlauf bei maximalem Widerstand am Luftspalt musste bei einer Temperatur von 100 °C abgebrochen werden, da die Isolationsschicht aus EPP nur für eine Betriebstemperatur bis 110 °C ausgelegt ist.

In Abbildung 6.2 ist gut zu erkennen, dass sich die Temperaturverläufe aller drei Zustände unterscheiden. Bei der Messung mit minimalem Wärmewiderstand ist der sinusförmige Verlauf der Heizleistung gut wiederzuerkennen. Die Maximaltemperatur liegt bei 73 °C und

die minimale bei 35°C . Die höchste Temperatur im Fall des maximalen Wärmewiderstandes konnte nicht aufgenommen werden, liegt jedoch bei weit über 100°C . An der Temperaturkurve der geregelten Wärmebrücke ist zu erkennen, dass sich der Temperaturverlauf zwischen den beiden anderen Kennlinien einpegelt. Die Temperaturkurve liegt hier in einem Intervall von ca. 50°C bis 80°C . Es ist deutlich zu erkennen, dass der Verlauf nicht genau sinusförmig ist. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Änderung des Widerstandes stattgefunden hat. Diese bewirkt eine Einschränkung der Temperaturschwankung auf ein Intervall von ca. 30 K. Dabei wird die Temperatur bei minimaler Heizleistung um 14 K angehoben. Das Maximum liegt 7 K über dem Verlauf bei minimalen Widerstand. Das bedeutet, dass der minimale Widerstand noch nicht erreicht wurde. Trotzdem ist eine eindeutige Einschränkung des Temperaturintervalls zu erkennen. Eine Regulierung des Temperaturverlaufs im vorgeschriebenen Intervall wurde erreicht.

6.2.2 Rechteckiger Heizverlauf

Im zweiten Fall wurde die Patrone mit einem Rechteckimpuls als Eingangssignal angesteuert. Dieser entspricht zwei zeitversetzten Sprungfunktionen am Eingang des Systems. Mit diesem Versuch soll die vorangegangene thermische Modellbildung überprüft werden. Die maximale Heizleistung beträgt in diesem Fall 30 W und die minimale 0,7 W. Auch in diesem Fall wurden drei Temperaturkurven aufgezeichnet, um den Effekt der Wärmeregulierung zu verdeutlichen (Abbildung 6.3).

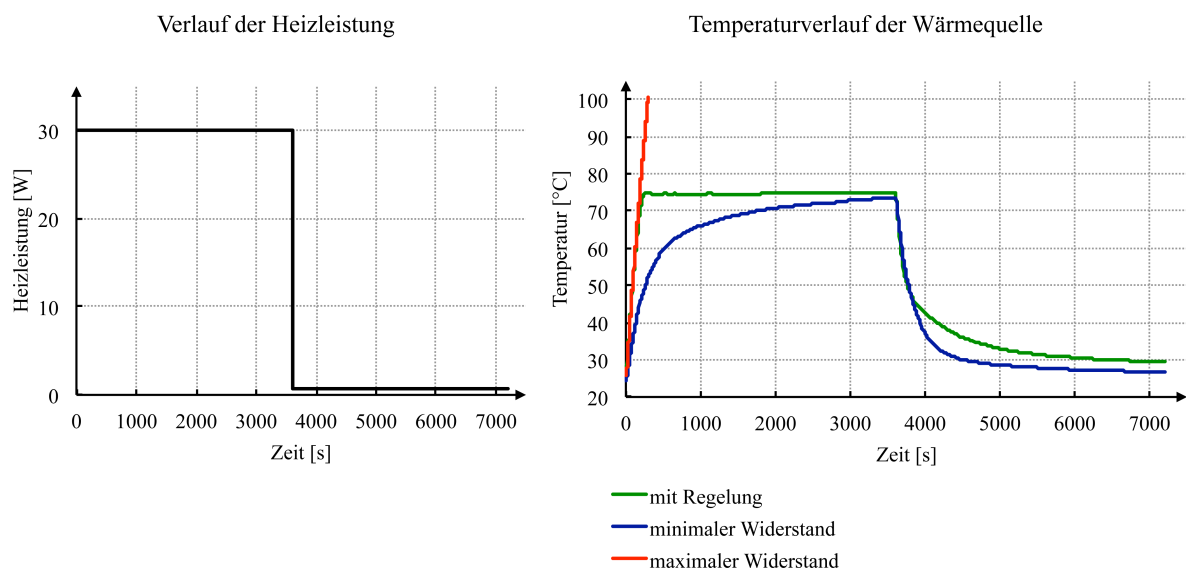


Abbildung 6.3: Signalverlauf zweiter Versuch

Zur Bewertung der thermischen Modellierung sind in in Abbildung 6.4 der aufgenommene Temperaturverlauf, sowie der modellierte Temperaturverlauf dargestellt. Der modellierte

Temperaturverlauf ergibt sich für die Erwärmung aus dem Modell mit minimalen Widerstand $T(R_{min}, P)$ (4.20) und für die Abkühlung aus dem Modell mit maximalen Widerstand $T(R_{max}, P)$ (4.21).

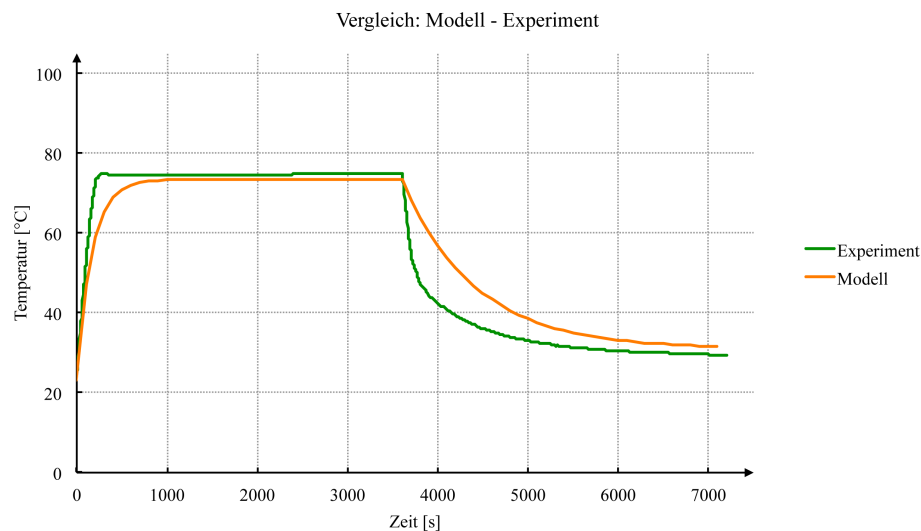


Abbildung 6.4: Vergleich: Experiment - Modell

Es ist zu erkennen, dass die Endtemperaturen, an welche sich die Kurven von Modell und Messung annähern nur um wenige Kelvin voneinander abweichen. Die Temperaturgrenzen lassen sich somit durch das Modell gut vorausbestimmen.

Etwas ungenauer ist die Beschreibung der Zeitkonstanten. Das Problem bei der Beschreibung dieser liegt darin, dass die Zeitkonstanten sich mit wechselndem Widerstand am Luftspalt verändern. Dies bedeutet, die Konstante ändert sich im Laufe der Erwärmung. Wie diese Änderung verläuft, wurde nicht untersucht. Um trotzdem eine Voraussage treffen zu können, kann eine maximale Zeitkonstante angegeben werden. Diese ergibt sich bei der Erwärmung aus dem Modell (4.20). Für die Abkühlung kann diese aus Gleichung (4.21) ermittelt werden. Die nachfolgende Tabelle stellt die experimentell ermittelten und die berechneten Zeitkonstanten dar.

Tabelle 6.1: Vergleich: aufgenommene Zeitkonstante - maximale Zeitkonstante

Vorgang	aufgenommene Zeitkonstante [s]	maximale (berechnete) Zeitkonstante [s]
Erwärmung	42	167
Abkühlung	658	820

Die modellierten Zeitkonstanten sind größer als die ermittelten. Sie genügen jedoch, um einen ersten Eindruck für die Dauer des Aufwärmvorganges zu gewinnen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein selbstregulierender Wärmewiderstand realisiert. Dies bedeutet, es wurde eine Wärmebrücke entworfen, welche in Abhängigkeit der Temperatur auf der Seite der Wärmequelle den Wärmedurchgangswiderstand ändert. Ziel dabei ist, dass bei großer Heizleistung viel Wärme und bei geringer Heizleistung möglichst wenig Wärme von der Quelle abgeführt wird. Diese wird somit in einem bestimmten Temperaturintervall geregelt. Dabei wird die Änderung des Durchgangswiderstandes völlig selbstständig durch den speziell entworfenen Formgedächtnisaktor ausgeführt. Dieser nutzt die Wärme der Quelle zur Aktivierung der Phasenumwandlung. Die Regulierung des Wärmedurchgangswiderstandes verläuft somit völlig energieautark.

Um die Funktion des entworfenen Prinzips nachzuprüfen, wurde ein Demonstrator der selbstregulierenden Wärmebrücke aufgebaut und mithilfe entsprechender Versuche auf seine Leistungsfähigkeit untersucht. Dabei wurde der Einsatz der Wärmeregulierung an einer Wärmequelle mit schwankender Heizleistung nachgestellt. Die Versuche haben gezeigt, dass eine deutliche Einschränkung des Temperaturintervalls stattgefunden hat. Bei einem sinusförmigen Heizverlauf mit einer Minimalleistung von 5 W und einer Maximalleistung von 30 W wurde ein Temperaturverlauf in einem Intervall von 30 °C bis 75 °C aufgenommen. Damit wurden die angesetzten Vorgaben erreicht.

Ein weiterer Aufgabenpunkt dieser Arbeit war die Modellierung des Temperaturverlaufs in der Wärmebrücke. Ziel war es, die Temperatur der Quelle in Abhängigkeit der Heizleistung vorauszubestimmen. Ein entsprechendes Modell wurde entworfen und anschließend mithilfe von Experimenten untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die stationären Endwerte auf wenige Kelvin genau vorausbestimmt werden können. Für die Zeitkonstanten der Erwärmungs- bzw. Abkühlvorgänge können jedoch nur Maximalwerte angegeben werden, da sich diese in Abhängigkeit der Temperatur ändern.

Weiterhin wurde ein Modell zur Beschreibung des Aktorverhaltens ausgearbeitet. Dieses ermöglicht die Auslegung eines Formgedächtnisaktors bestehend aus einer FGL-Feder und einer Rückstellfeder. Beide Federkennlinien müssen linear sein. Die experimentelle Verifizierung dieses Modells wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen.

7.2 Ausblick

Ein erster Ansatzpunkt zur weiteren Arbeit ist die Untersuchung des Modells für den Federaktor. Dazu muss ein Versuchsaufbau entworfen werden, der es ermöglicht verschiedene vorgegebene Hubweiten mit dem Aktor zu fahren und anschließend die Druckkraft am Anschlag zu ermitteln. Für diese Versuche sollte ein Aktor bestehend aus zwei Schraubenfedern verwendet werden. Diese, egal ob Zug- oder Druckfeder, ermöglichen einen größeren Vorspannweg und somit einen längeren Hub. Der Hubweg, welcher mit Blattfedern erreicht werden kann, ist relativ gering. Es besteht die Möglichkeit größere Federblätter zu verwenden, was jedoch den gesamten Aktoraufbau stark vergrößert.

Ein zweiter wichtiger Punkt, den es zu betrachten gilt, ist die Langzeitstabilität des Aktors und damit auch der gesamten Wärmebrücke. Formgedächtnislegierungen haben die Eigenschaft, dass mit zunehmender Anzahl der Phasenumwandlungszyklen die Verformungsfähigkeit des Materials abnimmt. Darum ist es notwendig, die Abnahme der Dehnung in Abhängigkeit der Belastungszyklen aufzunehmen. Diese Werte bilden die Basis für eine Vorhersage der Lebensdauer des Aktors. Weiterhin kann bei der Auslegung des Hubweges eine Sicherheit einberechnet werden. Darauf aufbauend kann die Funktion des Aktors trotz Abnahme des Dehnungsvermögens über einen langen Zeitraum gewährleistet werden.

Literaturverzeichnis

- [Czo11] CZORNY, Christoph: Aufbau eines Demonstrators für einen schaltbaren Wärmewiderstand / Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences. 2011. – Praktikumsbeleg
- [Gro06] GROLL, Manfred: *Wärmerohre als Bauelement in der Energietechnik*. Akademie Verlag, 2006. – Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
- [Haa09] HAASE, Robert: *Messtechnische Untersuchung von flächenhaften Aktoren aus thermischer Formgedächtnislegierung*, Diplomarbeit, 2009
- [HMC] HMC H. MEYER CO. SPEZIALSTAHL GMBH: *Kaltgewalzter Federbandstahl - Produktinformation*. <http://www.federstahl.de/federstahl/federbandstahl/index.html>. – Zugriff 06.11.2011
- [Hof] HOFFMANN GROUP: *Daten Fühlerlehrenband*. <http://eshop.hoffmann-group.com/index.php?SIDex=3416a75f4cea9109507cacd8e2f2aefc>. – Zugriff 03.09.2011
- [Jun08] JUNKER, Tom: *Entwurf, Berechnung und Untersuchung einer aktorischen Komponente auf Basis einer Kombination von Piezo- und Formgedächtnislegierungs-Aktoren*, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences, Diplomarbeit, 2008
- [Jun09] JUNG, Jakob: *Aufbau eines Greifmechanismus mit FGL-Drahtaktoren*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2009
- [KK09] KRETZSCHMAR, Hans-Joachim ; KRAFT, Ingo: *Kleine Formelsammlung technische Thermodynamik*. 3., erw. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2009
- [MWJV07a] MUHS, Dieter ; WITTEL, Herbert ; JANNESCH, Dieter ; VOSSIEK, Joachim: *Roloff/Matek Maschinenelemente Normung Berechnung Gestaltung*. 18., bearb. und erw. Berlin [u.a.] : Vieweg, 2007. – ISBN 978-3-8348-0262-0
- [MWJV07b] MUHS, Dieter ; WITTEL, Herbert ; JANNESCH, Dieter ; VOSSIEK, Joachim: *Roloff/Matek Maschinenelemente Tabellen*. 18., bearb. und erw. Berlin [u.a.] : Vieweg, 2007. – ISBN 978-3-8348-0262-0
- [Mül09] MÜLLER, Dr. A.: *Patent DE102009049196A1: Fahrzeug mit gesteuerter Heat-Pipe*. 2009
- [Nuß95] NUSSKERN, Hans: Thermische Stellelemente in der Gerätetechnik. In: *Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Messtechnik* 9 (1995)

- [Oel04] OELSCHLÄGER, Lars: *Numerische Modellierung des Aktivierungsverhaltens von Formgedächtnisaktoren am Beispiel eines Schrittantriebes*, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 2004
- [PCE11] PCE DEUTSCHLAND GMBH: *Bedienungsanleitung Datenlogger PCE-T800*. 2011
- [Sch] SCHAAF, Alexander: *Abbildung Rotationswärmetauscher*. <http://www.wohnung-lüften.de/upload/Rotationswärmetauscher.jpg>. – Zugriff 06.11.2011
- [Sch07] SCHAEFFLER KG: *Technisches Taschenbuch*. Schaeffler KG, 2007
- [Sch09] SCHIEDECK, Florian: *Entwicklung eines Modells für Formgedächtnisaktoren im geregelten dynamischen Betrieb*, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Diss., 2009
- [Sch11] SCHOLKOFISKY, Jan: *Messtechnische Untersuchung und Modellierung energieautarker Formgedächtnisaktoren* / Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden. 2011. – Praktikumsbeleg
- [Tot10] TOTZAUER, Werner: *Technische Mechanik - Elastizitätslehre*. 2010. – Vorlesungsskript - Hochschule Mittweida
- [Umw] UMWELTBUNDESAMT: *Energieeffiziente Technologien und effizienzsteigernde Maßnahmen Praxiserprobte Anwendungen und Innovationen*. <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M172.pdf>. – Forschungsbericht. – Zugriff 06.11.2011

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 17.11.2011

Christoph Czorny

A Bestimmung der Übertragungsfunktion des thermischen Ersatzschaltbildes

Ausgangspunkt zur Bestimmung der Übertragungsfunktion ist folgendes thermisches Netzwerk:

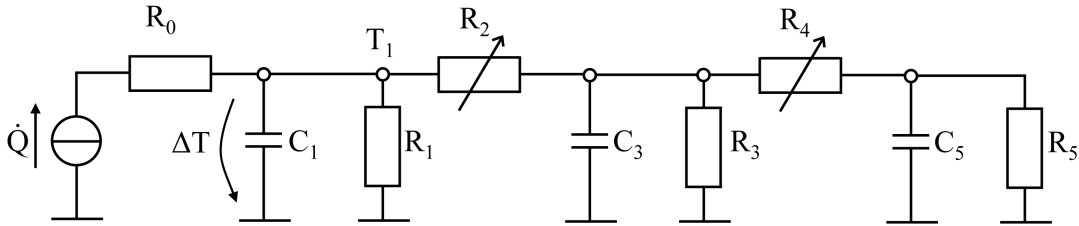


Abbildung A.1: thermisches Ersatzschaltbild

Es wird die Übertragungsfunktion (B.1) angesetzt.

$$H(s) = \frac{U_a}{I_e} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = R_{ers} \quad (\text{A.1})$$

Der Ersatzwiderstand R_{ers} entspricht dem gesamten Widerstand der restlichen Schaltung (außer $R_{\lambda K}$). Dieser setzt sich folgendermaßen im Bildbereich zusammen:

$$H(s) = \frac{1}{C_1 s + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{C_3 s + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4 + \frac{1}{C_5 s + \frac{1}{R_5}}}}} \quad (\text{A.2})$$

Dieser Ausdruck wird nun Schritt für Schritt gleichnamig gemacht, sodass am Ende ein Therm entsteht, welcher in den Zeitbereich transformiert werden kann. Um das Vorgehen zu verdeutlichen ist nachfolgend ein erster Umformungsschritt dargestellt.

$$H(s) = \frac{1}{C_1 s + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{C_3 s + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4(C_5 s + \frac{1}{R_5}) + 1}}}} \quad (\text{A.3})$$

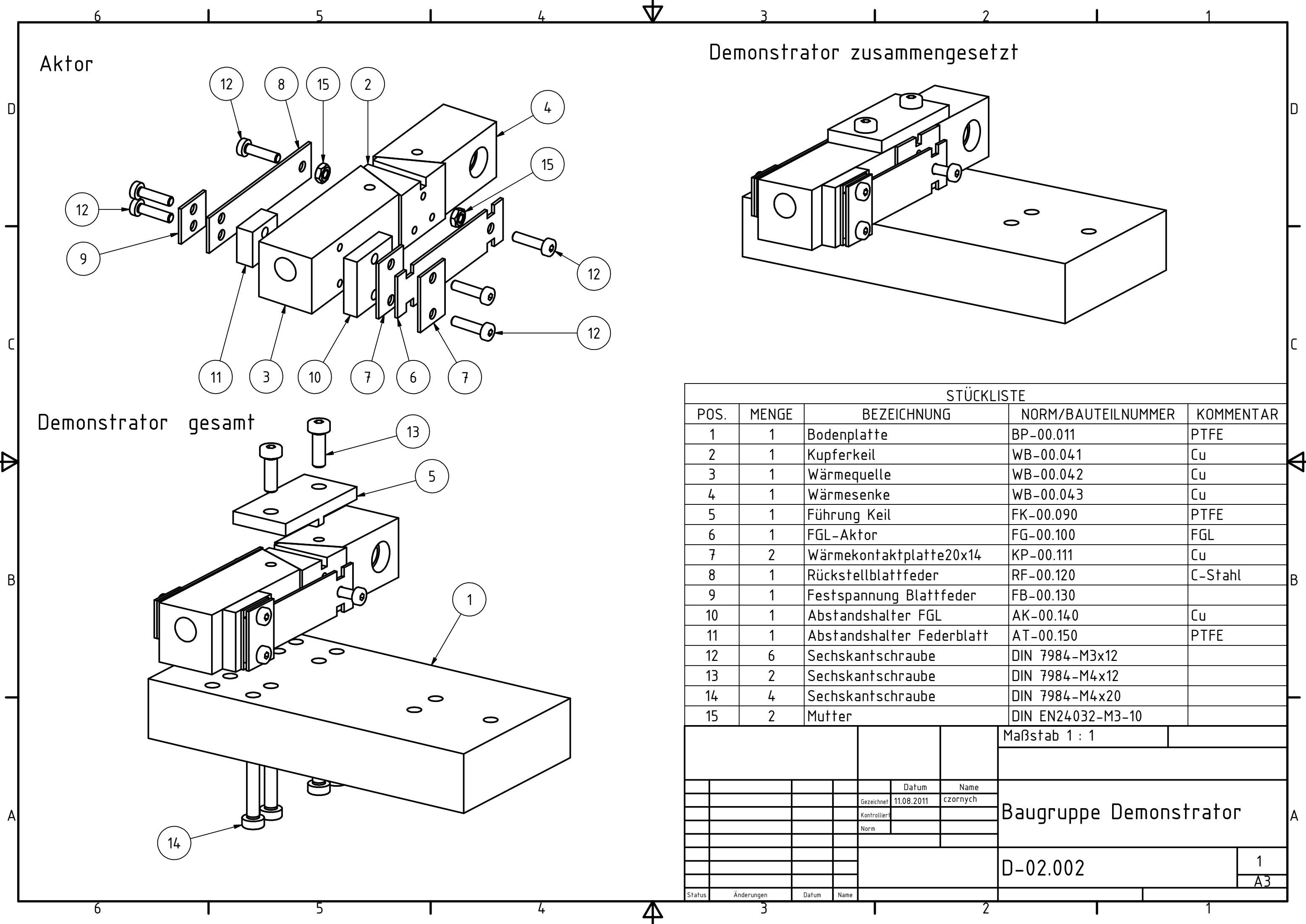
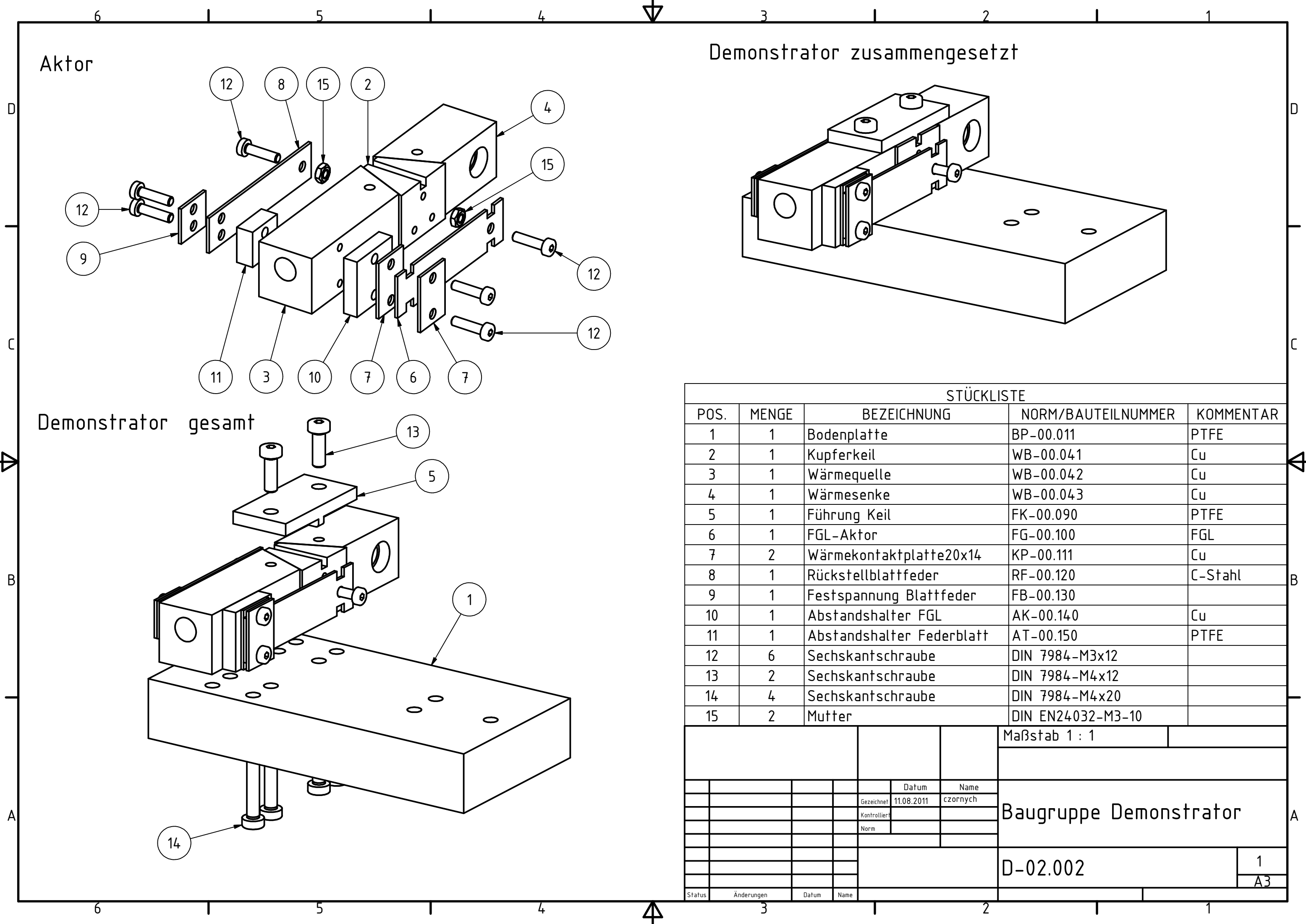
Nach einigen Umformungsschritten ergibt sich die Form (B.4).

$$\begin{aligned}
H(s) = & \frac{(R_2 R_4 C_3 C_5) s^2 + \left(C_3 \left(\frac{R_2 R_4}{R_5} + R_2 \right) + C_5 \left(\frac{R_2 R_4}{R_3} + R_2 + R_4 \right) \right) s}{(R_2 R_4 C_1 C_3 C_5) s^3 + \left(C_1 C_3 \left(R_2 \frac{R_4}{R_5} + R_2 \right) + C_1 C_5 \left(R_4 \frac{R_2}{R_3} + R_2 + R_4 \right) + C_3 C_5 R_4 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \right) s^2 + \left(C_1 \left(\frac{R_2 R_4}{R_3 R_5} + \frac{R_2}{R_3} + \frac{R_2}{R_5} + \frac{R_4}{R_5} + 1 \right) \right) s + \dots} \\
& + \frac{R_4 \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right) + \frac{R_2}{R_3} + \frac{R_2}{R_5} + 1}{\dots} \\
& + \frac{C_3 \left(\frac{R_2 R_4}{R_1 R_5} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_5} + 1 \right) + C_5 \left(\frac{R_2 R_4}{R_3 R_1} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3} + 1 \right) s + \frac{1}{R_1} \left(R_2 \left(\frac{R_4}{R_3 R_5} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right) + \frac{R_4}{R_3 R_5} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right)}{\dots}
\end{aligned} \tag{A.4}$$

Es ist zu erkennen, dass die Übertragungsfunktion der Form

$$H(s) = \frac{As^2 + Bs + C}{Ds^3 + Es^2 + Fs + G} \tag{A.5}$$

entspricht. Diese wird nun wie in Abschnitt 4.3.4 beschrieben durch Partialbruchzerlegung so umgeformt, dass sie in den Zeitbereich transformiert werden kann.

[illegible][illegible][illegible]

STÜCKLISTE									
POS.	MENGE	BEZEICHNUNG			NORM/BAUTEILNUMMER			KOMMENTAR	
1	1	Bodenplatte			BP-00.011			PTFE	
2	1	Kupferkeil			WB-00.041			Cu	
3	1	Wärmequelle			WB-00.042			Cu	
4	1	Wärmesenke			WB-00.043			Cu	
5	1	Führung Keil			FK-00.090			PTFE	
6	1	FGL-Aktor			FG-00.100			FGL	
7	2	Wärmekontaktplatte20x14			KP-00.111			Cu	
8	1	Rückstellblatffeder			RF-00.120			C-Stahl	
9	1	Festspannung Blatffeder			FB-00.130				
10	1	Abstandshalter FGL			AK-00.140			Cu	
11	1	Abstandshalter Federblatt			AT-00.150			PTFE	
12	6	Sechskantschraube			DIN 7984-M3x12				
13	2	Sechskantschraube			DIN 7984-M4x12				
14	4	Sechskantschraube			DIN 7984-M4x20				
15	2	Mutter			DIN EN24032-M3-10				
								Maßstab 1 : 1	
					Datum	Name	Baugruppe Demonstrator		
				Gezeichnet	11.08.2011	czornych			
				Kontrolliert					
				Norm					
							D-02.002		1
							A3		
Status	Änderungen	Datum	Name						

STÜCKLISTE									
POS.	MENGE	BEZEICHNUNG			NORM/BAUTEILNUMMER			KOMMENTAR	
1	1	Bodenplatte			BP-00.011			PTFE	
2	1	Kupferkeil			WB-00.041			Cu	
3	1	Wärmequelle			WB-00.042			Cu	
4	1	Wärmesenke			WB-00.043			Cu	
5	1	Führung Keil			FK-00.090			PTFE	
6	1	FGL-Aktor			FG-00.100			FGL	
7	2	Wärmekontaktplatte20x14			KP-00.111			Cu	
8	1	Rückstellblatffeder			RF-00.120			C-Stahl	
9	1	Festspannung Blatffeder			FB-00.130				
10	1	Abstandshalter FGL			AK-00.140			Cu	
11	1	Abstandshalter Federblatt			AT-00.150			PTFE	
12	6	Sechskantschraube			DIN 7984-M3x12				
13	2	Sechskantschraube			DIN 7984-M4x12				
14	4	Sechskantschraube			DIN 7984-M4x20				
15	2	Mutter			DIN EN24032-M3-10				
								Maßstab 1 : 1	
					Datum	Name	Baugruppe Demonstrator		
				Gezeichnet	11.08.2011	czornych			
				Kontrolliert					
				Norm					
							D-02.002		1
							A3		
Status	Änderungen	Datum	Name						

						Maßstab 1 : 1		
				Datum	Name	Baugruppe Demonstrator		
				Gezeichnet	11.08.2011			czornych
				Kontrolliert				
				Norm				
						D-02.002		
						1		
						A3		
Status	Änderungen	Datum	Name					

				Datum	Name	Baugruppe Demonstrator	
				Gezeichnet	11.08.2011		czornych
				Kontrolliert			
				Norm			
						D-02.002	
						1	
						A3	
Status	Änderungen	Datum	Name				

					D-02.002	1	
							A3
Status	Änderungen	Datum	Name				

					D-02.002		1
							A3
Status	Änderungen	Datum	Name				

Status	Änderungen	Datum	Name
--------	------------	-------	------

C Modellierung Federaktor

C.1 Bestimmung der Hubweite H (3.1)

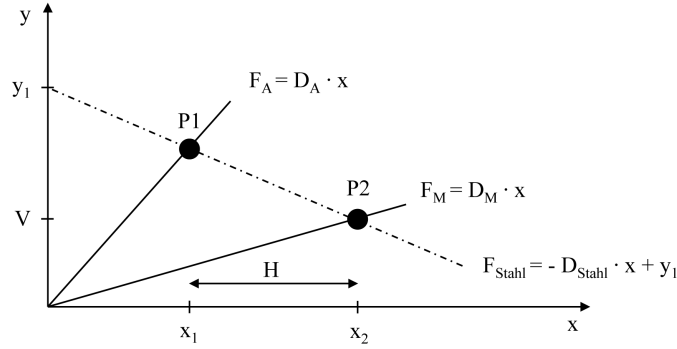


Abbildung C.2: Variablen der Modellierung

Ausgangspunkt ist folgender Zusammenhang für den Hub:

$$H = x_2 - x_1 \quad (\text{C.6})$$

$$x_2 = \frac{V}{D_M} \quad (\text{C.7})$$

Um x_1 zu ermitteln wird die Austenitkennlinie F_A mit der Kennlinie der Rückstellfeder F_{Stahl} gleichgesetzt. Dazu muss der Schnittpunkt von F_{Stahl} mit der y-Achse bestimmt werden.

$$F_{Stahl} = -D_{Stahl} \cdot x + y_1 \quad (\text{C.8})$$

$$y_1 = V + D_{Stahl} \cdot x_2 \quad (\text{C.9})$$

$$F_{Stahl} = -D_{Stahl} \cdot x + V + D_{Stahl} \cdot x_2 \quad (\text{C.10})$$

Nun werden die Kennlinien an der Stelle $x = x_1$ gleichgesetzt und nach x_1 aufgelöst.

$$F_A(x_1) = F_{Stahl}(x_1) \quad (\text{C.11})$$

$$D_A \cdot x_1 = -D_{Stahl} \cdot x_1 + V + D_{Stahl} \cdot x_2 \quad (\text{C.12})$$

$$x_1 \cdot (D_A + D_{Stahl}) = V + D_{Stahl} \cdot x_2 \quad (\text{C.13})$$

$$x_1 = \frac{V + D_{Stahl} \cdot x_2}{D_A + D_{Stahl}} \quad (\text{C.14})$$

Es wird x_2 ersetzt (A.2).

$$x_1 = \frac{V}{D_A + D_{Stahl}} + \frac{D_{Stahl} \cdot V}{(D_A + D_{Stahl}) \cdot D_M} \quad (C.15)$$

$$x_1 = V \cdot \left(\frac{1}{D_A + D_{Stahl}} + \frac{D_{Stahl}}{D_M \cdot (D_A + D_{Stahl})} \right) \quad (C.16)$$

Anschließend werden x_1 und x_2 in die Ausgangsformel (A.1) eingesetzt.

$$H = \frac{V}{D_M} - V \cdot \left(\frac{1}{D_A + D_{Stahl}} + \frac{D_{Stahl}}{D_M \cdot (D_A + D_{Stahl})} \right) \quad (C.17)$$

$$H = V \cdot \left[\frac{1}{D_M} - \left(\frac{1}{D_A + D_{Stahl}} + \frac{D_{Stahl}}{D_M \cdot (D_A + D_{Stahl})} \right) \right] \quad (C.18)$$

$$H = V \cdot \left(\frac{1}{D_M} - \frac{1}{D_A + D_{Stahl}} - \frac{D_{Stahl}}{D_M \cdot (D_A + D_{Stahl})} \right) \quad (C.19)$$

$$(C.20)$$

C.2 Bestimmung der Hubweite H' in Abhängigkeit der Restdruckkraft (3.2)

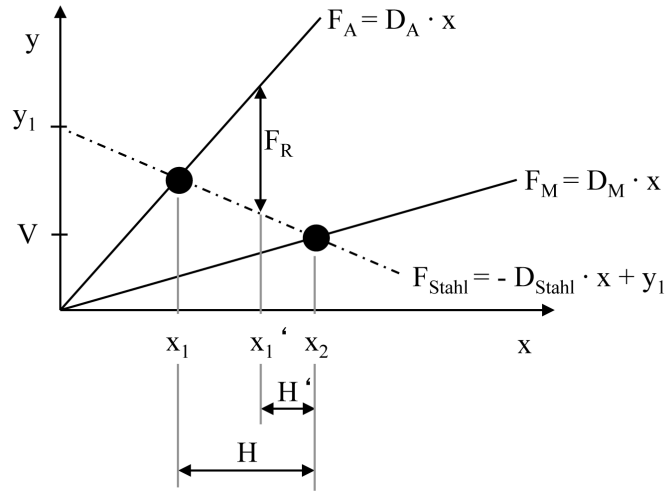


Abbildung C.3: Variablen der Modellierung

Ausgangspunkt der Herleitung ist der Hub H' :

$$H' = H - (x_1' - x_1) \quad (\text{C.21})$$

Die Restdruckkraft F_R ergibt sich folgendermaßen.

$$F_R = (x_1' - x_1) \cdot (D_A + D_{Stahl}) \quad (\text{C.22})$$

$$(x_1' - x_1) = \frac{F_R}{D_A + D_{Stahl}} \quad (\text{C.23})$$

Dieser Term wird eingesetzt in (A.16).

$$H' = H - \frac{F_R}{D_A + D_{Stahl}} \quad (\text{C.24})$$